

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Hodnocení kvality povrchu po laserovém řezání

The Evaluation of Surface Quality after Laser Cutting

Student:

Václav Trunda

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student:

Václav Trunda

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Hodnocení kvality povrchu po laserovém řezání
The Evaluation of Surface Quality after Laser Cutting

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Obecná charakteristika daného problému.
3. Návrh experimentální činnosti.
4. Zpracování naměřených výsledků a jejich vyhodnocení.
5. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2009. 146 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [2] VASILKO, K.; KMEC, J. *Delenie materiálu: Teória a technológia*. Prešov : 2003. 232 s. ISBN 80-7099-903-9.
- [3] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. Košice : Technická univerzita Košice, Viena, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
- [4] EL-HOFY, H. *Advanced Machining Processes – Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. Egypt : Alexandria University, 2005, ISBN 0-07-145334-2.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Václav Trunda

Adresa trvalého pobytu autora práce: Boleslavova 356/22, Olomouc, 77900

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

TRUNDA, V. *Hodnocení kvality povrchu po laserovém řezání*: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 61 s. Vedoucí práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá laserovou technologií dělení materiálu. V teoretické části je vysvětlen princip laseru, jeho rozdělení dle aktivního prostředí a možnosti použití ve strojírenství. V práci je také obsažena teorie o vyhodnocení drsnosti povrchu včetně uvedení základních norem. Experimentální část je zaměřena na vyhodnocení drsnosti povrchu v závislosti na nastavených parametrech CO₂ laseru pomocí optického mikroskopu Alicona. Na základě vyhodnocení jednotlivých vzorků bude určeno ideální nastavení parametrů stroje.

Klíčová slova: Laser, laserové dělení materiálu, měření drsnosti povrchu, parametry drsnosti povrchu

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

TRUNDA, V. *The Evaluation of Surface Quality after Laser Cutting*: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machinig, Assembly and Metrology, 2017, 61 p. Thesis head: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

This bachelor thesis is about the laser cutting technology. The theoretical part explains the principle of the laser types and classification and its application in the engineering industry. The thesis also contains the theory of surface roughness evaluation, including the introduction of basic standards. The experimental part is focused on the evaluation of the surface roughness depending on the set parameters of the CO₂ laser by the Alicon optical microscope. The ideal setting of the machine parameters will be determined after comparison between each samples.

Keywords: Laser, laser cutting technology, measuring of surface roughness, parameters of surface roughness

Obsah bakalářské práce

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	10
1 Obecná charakteristika daného problému.....	11
1.1 Vlastnosti a vznik laserového záření	11
1.2 Stavba laserového zařízení.....	14
1.2.1 Laserová hlavice a její obsah	15
1.3 Vlastnosti laserového paprsku	17
2 Druhy laserů.....	19
2.1 Pevnolátkové lasery	20
2.2 Polovodičové lasery	21
2.3 Plynové lasery	21
2.4 Kapalinové lasery	22
3 Laserové obrábění	23
3.1 Laserové řezání	23
3.2 Laserové vrtání	25
3.3 Laserové svařování	25
3.4 Laserové opracování povrchů	26
3.4.1 Laserové kalení	26
3.4.2 Laserové značení.....	27
3.5 Parametry laserového řezání	27
3.5.1 Poloha ohniska	28
3.5.2 Ohnisková vzdálenost	28
3.5.3 Výkon laseru	29
3.5.4 Řezná rychlost.....	29
3.5.5 Režim řezání a zapichování	30
3.5.6 Průměr a geometrie trysky	30
3.6 Vyhodnocení kvality a vad laserových řezů	31

3.6.1	Veličiny určující kvalitu povrchu řezu - ČSN ISO 9013	32
3.6.2	Veličiny určující vady řezu - ČSN EN ISO 17658	33
3.6.3	Tepelně ovlivněná oblast	34
4	Drsnost povrchu a její měření	35
4.1	Dotyková metoda měření drsnosti povrchu	37
4.2	Metoda bezdotyková	37
5	Návrh experimentální práce	39
5.1	Popis cíle činnosti	39
5.2	Zkoušený materiál	39
5.3	Laserový stroj	39
5.3.1	Bezpečnost práce	41
5.4	Optický mikroskop Alicona	41
5.5	Vyhodnocení vzorků	43
5.6	Zhodnocení naměřených výsledků	52
	Závěr	54
	Seznam použité literatury	55
	Seznam příloh	59

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A	tloušťka zpracovávaného kusu	[mm]
B	vzdálenost trysky	[mm]
BA (z)	nosná plocha	[%]
C	směr posunu	[-]
CNC	počítačem řízený obráběcí stroj	[-]
ČSN EN ISO	mezinárodní norma	[-]
D	šířka řezné spáry	[mm]
D ₁ , D ₂	průměr ohniska	[mm]
E	energetická hladina	[J]
E ₁	základní energetická hladina	[J]
E ₂	vybuzená energetická hladina	[J]
Er:YAG	yttrium-aluminium-granátu, dopovaný erbiem	[-]
F	délka řezu	[mm]
G	šířka řezné spáry na spodní ploše	[mm]
H	směr řezání	[-]
I	výstupní intenzita záření	[W·cm ⁻²]
J	řezná tloušťka	[mm]
L ₁ , L ₂	hloubka ostrosti	[mm]
Mr ₁	podíl materiálu nad profilem jádra	[%]
Mr ₂	podíl materiálu pod profilem drsnosti	[%]
Nd:YAG	yttrium-aluminium-granátu, dopovaný neodymem	[-]
Nd:YLF	lithium – yttrium – fluoridu, dopovaný neodymem	[-]
Nd ³⁺	iont neodymu	[-]
Ra	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	[μm]
Re	mez kluzu	[MPa]
Rk	hloubka profilu jádra drsnosti	[μm]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
Rmr	materiálový podíl	[%]
Rp	největší výška výstupku profilu	[μm]
Rpk	redukovaná výška vrcholů	[μm]
Rq	průměrná kvadratická úchylka profilu	[μm]
Rt	celková výška profilu	[μm]
Rv	největší hloubka prohlubně profilu	[μm]

R_{vk}	redukovaná výška prohlubní	[μm]
R_z	největší výška profilu	[μm]
$R_{z_1} - R_{z_5}$	největší výška profilu základní délky	[μm]
$R_{z_{1\max}}$	maximální hloubka profilu	[μm]
TEM	transverzální elektromagnetický mód	[-]
TEM00	transverzální elektromagnetický mód nejnižšího řádu	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
UV	ultrafialové záření	[-]
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	ytrium Aluminium granátu	[-]
Z_{p_i}	výška výstupku profilu	[μm]
Z_{v_i}	hloubka prohlubně profilu	[μm]
a	referenční přímka	[-]
Δa	zmenšení tloušťky řezu	[mm]
c	výška referenčního řezu	[μm]
h	Planckova konstanta	[J·s]
ln	celková měřená délka drsnosti	[mm]
lr	základní délka drsnosti	[mm]
n	skluz laserového paprsku	[mm]
r	poloměr	[mm]
r_0	poloměr paprsku	[mm]
u	úchylka kolmosti	[mm]
z	hloubka nosného profilu	[μm]
β	úhel šikmého řezu	[°]
λ	vlnová délka	[nm]
λ_c	mezní vlnová délka	[μm]
v	frekvence záření	[s ⁻¹]

Úvod

Bakalářská práce byla vypracována ve společnosti Alvey Manex a.s., se sídlem v Bořeticích. Spadá pod zahraniční společnost Alvey Group a.s, která se zabývá v České republice kovovýrobou a kompletní konstrukcí automatických skladových zakládacích systémů, robotických paletizátorů, dopravníků palet včetně dodávky vlastního softwaru.

Strojírenský průmysl neustále vyžaduje vývoj nových, především efektivních technologií, které zrychlí a ulehčí výrobu různých součástí. Důležitým aspektem je kvalita vyhotovených výrobků, která usnadní jejich budoucí zpracování. Dělení materiálu je ve strojírenství nevyhnutelným požadavkem. Jednou z nejefektivnějších technologií pro tuto činnost je v dnešní době využití laseru. Laserové řezání nabízí několik výhod oproti běžným řezacím metodám, jako je například plazmové řezání. Pozitiva laserového řezání zahrnují vysokou produktivitu díky vysokým řezným rychlostem, úzkým řezným hranám, relativně malé oblasti ovlivněné teplem a CNC obráběcím strojům. Díky automatizaci jsou stroje velice přesné a umožňují zkrácení výrobních časů.

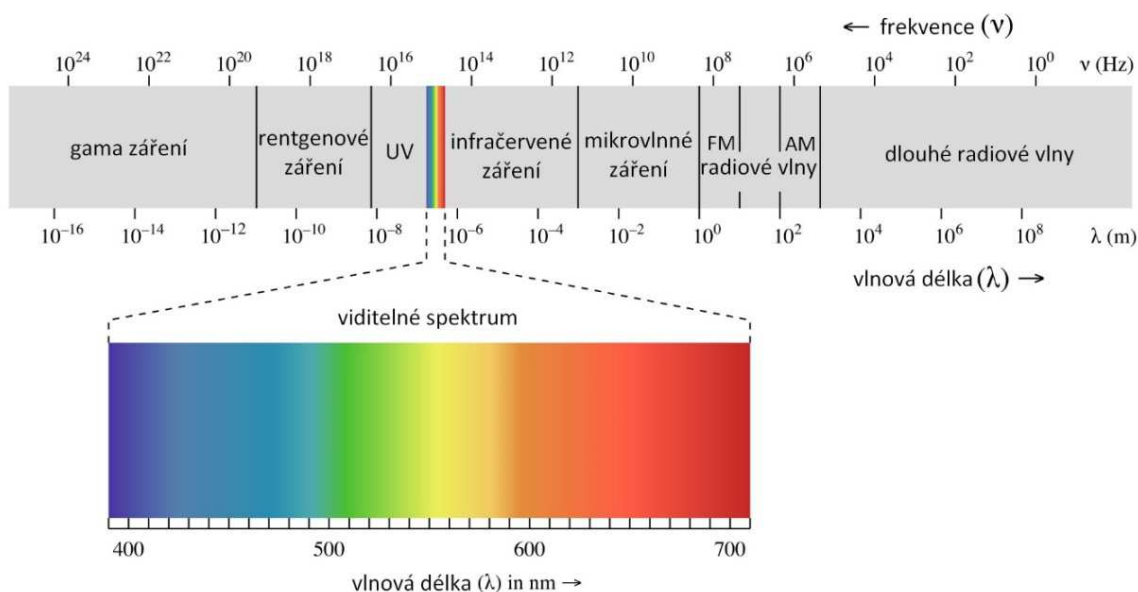
Cílem bakalářské práce je nastínit využití a vlastnosti nekonvenční technologie obrábění, konkrétně laserového řezání. Teoretická část se zabývá jednotlivými řeznými parametry a jejich vlivem na drsnost povrchu řezané hrany. Měření a kvantifikace povrchových defektů jsou důležitými prvky a funkčními indikátory ve strojírenském prostředí. Experimentální část znázorňuje rozdíly v drsnosti povrchu nařezaných vzorků při aplikaci různých parametrů stroje. Cílem práce je stanovení nejvhodnějších řezných parametrů a tím dosažení nejvyšší kvality řezu.

1 Obecná charakteristika daného problému

1.1 Vlastnosti a vznik laserového záření

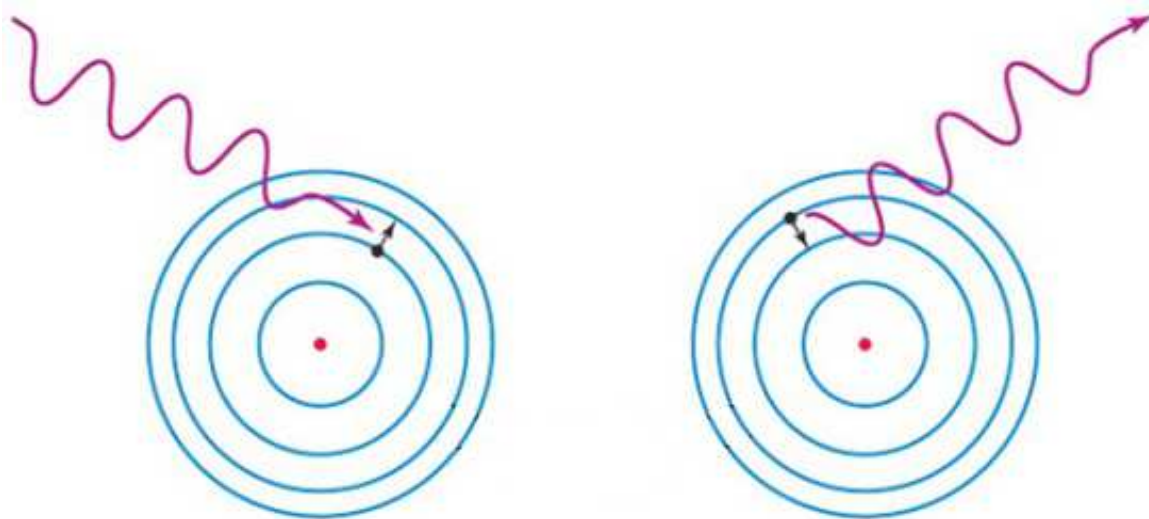
Historický vývoj poznatků o laserovém paprsku popsal v roce 1917 Albert Einstein na základě popisu teorie vynucené emise záření. V 50. letech minulého století vznikl nový obor – kvantová elektronika a bylo zkonstruováno zařízení, které generovalo a zesilovalo elektromagnetické záření pomocí stimulované emise záření. Vědci C. H. Towns a A. L. Shawlow v roce 1958 vytvořili první projekt laseru. V roce 1960 T. H. Maiman sestavil první laser, který obsahoval tyčinku ze syntetického rubínu jako aktivní látku. Vytvořené světlo mělo vlnovou délku 694,3 nm. Během let byl následně laserový generátor vytvořen mnoha způsoby. V současnosti byly vyrobeny lasery, které vypadají jako miniaturní elektronická součástka, skleněné vlákno délky několik desítek metrů nebo jako složitá chemická aparatura. [1, 23]

Slovo LASER je odvozeno z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což znamená „Zesílení světla pomocí stimulované emise záření“. Lasery jsou tedy zařízení, které vytváří elektromagnetické záření mající svá specifika. Laser nemusí produkovat jen světlo, které je obecně vnímáno jako viditelná složka elektromagnetického spektra (obr. 1.1), ale může to být i infračervená nebo ultrafialová složka. [1, 23]



Obr. 1.1 Spektrum elektromagnetického záření [18]

Základní princip laseru lze vysvětlit pomocí pojmů kvantové fyziky a zjednodušeného planetového modelu atomu. Elektrony se pohybují okolo kladně nabitého jádra (protonu) po uzavřených drahách. Elektrony podléhají přitažlivým elektrostatickým silám a určité dráze odpovídá vždy přesně dané množství energie, nazývané energetická hladina. Čím je dráha elektronu bližší jádru, tím je jeho energie menší. Každý atom se za normálních podmínek vyskytuje v kvantovém stavu s nejmenší energií (tzv. základním stavu). Což znamená, že všechny elektrony zaujímají nejnižší energetické hladiny, tedy se nacházejí v drahách o nejmenších poloměrech. Elektron se může vyskytovat jen na určitých energetických hladinách. Z čehož vyplývá, že změny energie elektronu nemohou probíhat plynule, ale po skocích, které přísluší drahám, na kterých se může elektron nacházet. Přechod elektronů ze základní hladiny na hladinu s vyšší energetickou hodnotou je doprovázen absorpcí, naopak přechod z vyšší na nižší energetickou hladinu se nazývá emise záření (obr. 1.2). Vybuzením, resp. dodáním příslušné energie je možné atom přinutit k emisi záření. [1, 9]



Obr. 1.2 Princip absorpce a emise záření [24]

Laserové světlo se obecně tvoří v prostředí specifického stimulujícího elektromagnetického záření utlumením spontánní emise na úkor vynucené emise záření. Emise záření je možná buď samovolná (spontánní), nebo stimulovaná (vynucená či indukovaná). Jak je uvedeno výše, atom má určitou energii a částice atomu mohou měnit své energetické stavy (nabitím energie přecházejí do stavů vyšší energetické hladiny a naopak) a mohou v nich zůstat různou dobu. U spontánní emise atom za rozdílnou dobu opustí vyšší hladinu a vyzáří elektromagnetické kvantum, avšak atom to udělá sám od sebe, tedy spontánně. [1] Princip spontánní emise je zobrazen na obr. 1.3.

Spontánní emise záření vzniká v případě, kdy vybuzené atomy s energetickou hladinou E_2 mají sklon zaujmout hladinu s nižší energií E_1 a souběžně emitují kvantum světelného záření s frekvencí. V excitovaném stavu je kvantová soustava nestabilní a snaží se zaujmout stav s co nejnižší energií. Při přechodu na nižší energetickou hladinu se pak uvolní energie, která odpovídá rozdílu energetických hladin podle vztahu: [1, 9]

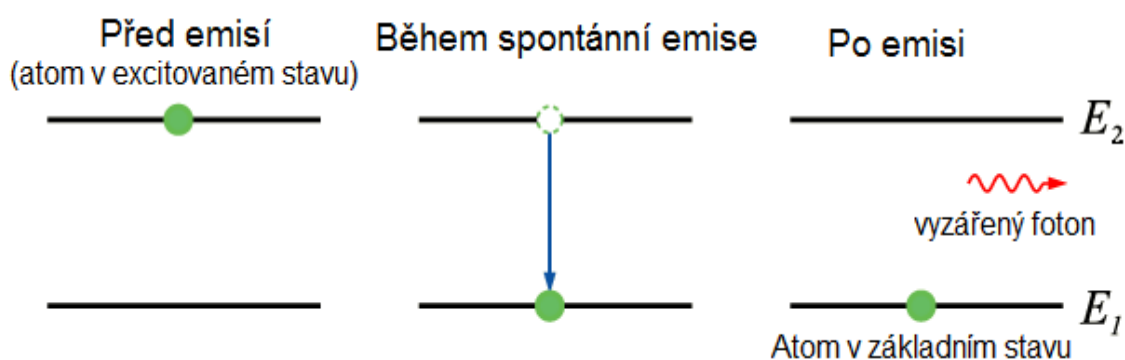
$$E = h \cdot \nu = E_2 - E_1 \quad (1.1)$$

Kde:

E je energetický rozdíl mezi hladinami [J],

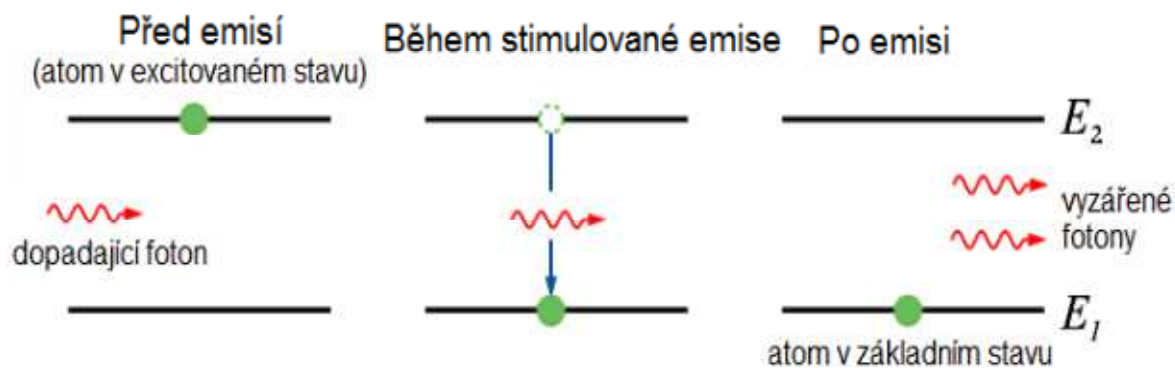
ν je frekvence záření [s^{-1}],

h je Planckova konstanta [$6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$].



Obr.1.3 Princip spontánní emise [33]

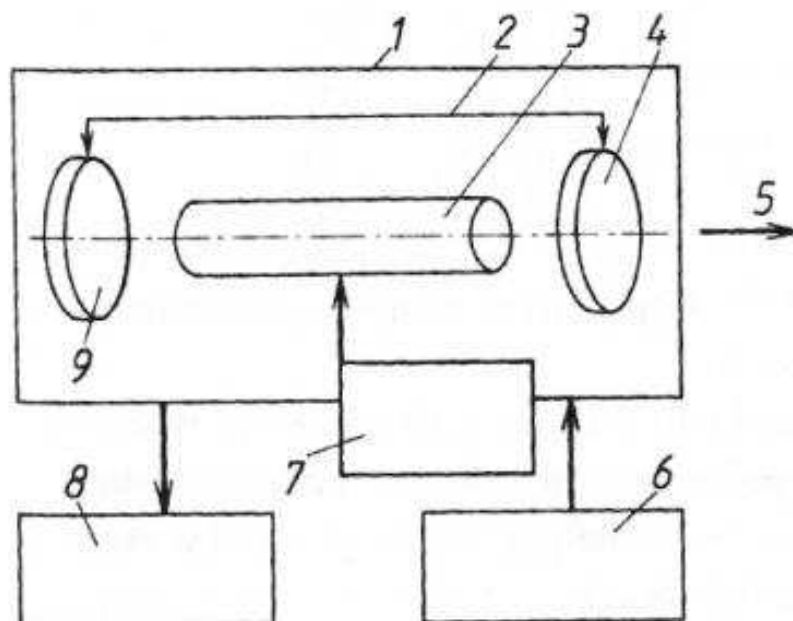
Pokud se atom, který se nachází v excitovaném stavu, dostane do interakce s fotonem záření o energii odpovídající energetickému rozdílu hladiny 2 a hladiny 1, dojde ke stimulovanému vyzáření fotonu. Stimulovaný foton má pak tyto vlastnosti: stejnou energii, směr, fázi a polarizaci s fotonem iniciačním. Znamená to tedy, že atom, kterému bylo dodáno vlivem vnějšího podmětu určité množství energie, se vrátí do základního stavu, tj. na nižší energetickou hladinu, odevzdáním přebytečné energie. Tento způsob emise se nazývá stimulovaná (vynucená) emise záření, přičemž se emituje nový kvant se stejnou frekvencí, jako měl předcházející kvant. [1, 9] Princip stimulované emise je zobrazen na obr. 1.4.



Obr. 1.4 Princip stimulované emise [35]

1.2 Stavba laserového zařízení

Mezi základní části laseru patří laserová hlavice, jejíž součástí jsou: laserové médium, rezonátor, polopropustné zrcadlo, nepropustné zrcadlo, dále budící zařízení, zdroj energie buzení, chladicí systém. [32] Schéma zařízení pro laserové obrábění je uvedeno na obr. 1.5.



Obr. 1.5 Schéma zařízení pro obrábění laserem [32]

- 1 – laserová hlavice, 2 – rezonátor, 3 – laserové médium, 4 – polopropustné zrcadlo, 5 – výstup paprsku, 6 – zdroj energie buzení, 7 – budící zařízení, 8 – chladicí systém, 9 – nepropustné zrcadlo

1.2.1 Laserová hlavice a její obsah

Laserové medium

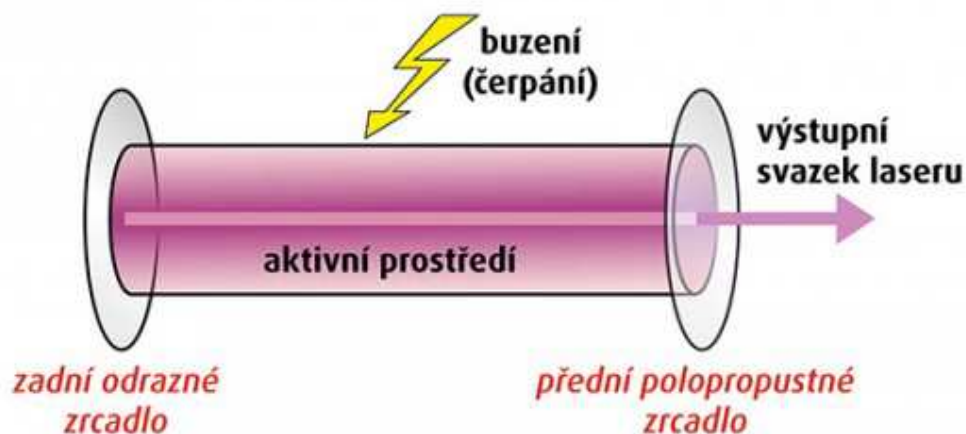
Tato část laseru, udává vlnovou délku vlny záření a vytváří tak aktivní prostředí. Je to sloučenina, ve které je možné elektrony nebo molekuly vhodným čerpáním vzbudit na požadovanou pracovní hladinu. Laserové medium obsahuje oddělené energetické hladiny elektronů, kde mohou elektrony přeskokovat z nižší energetické hladiny na vyšší, poté zpět na nižší energetickou hladinu. Následně je pak možné emitovat záření. Lasery pracují jen na principu stimulované emise.

Laserové medium je možné rozdělit do čtyř hlavních skupin: [19, 32]

- plynové – zde je aktivní prostředí jeden nebo více plynů (např. He:Ne, CO₂),
- pevnolátkové – prostředí je tvořeno krystalem (např. rubín, Nd:YAG, Er:YAG),
- diodové – představované polovodičem s přechodem typu p-n (např. GaAs, GaAsN),
- kapalinové – aktivní prostředí obsahuje roztoky různých organických barviv (např. Rhodamin-barvivo).

Rezonátor

Pomocí rezonátoru je možné zformovat a zesílit záření. Tím lze zesílit elektromagnetickou vlnu, která z něj vychází. Koherence, intenzita záření, spektrální a prostorové charakteristiky jsou dány konstrukcí rezonátoru. Optický rezonátor je konstruován z nejméně dvou zrcadel, ze kterých je jedno polopropustné a druhé odrazné (obr. 1.6). V rezonátoru je vlna emitovaná z aktivní látky, odráží se nazpět a při zpětném přechodu vzbuzuje další a další vynucené emise fotonů. Zrcadla rezonátoru jsou obvykle rovinná, ale mohou být i zakřivená. Podle aplikace laseru je možné použít zrcadla sférická v konfokálním stabilním nebo konfokálním nestabilním uspořádáním. Stabilita záření v rezonátoru je ovlivněna poloměrem zakřivení zrcadla a délkou rezonátoru. Průměr a zakřivení zrcadel udává intenzitu záření a energetickou rozbíhavost laserového záření, resp. divergenci paprsku. Intenzita záření v průřezu výstupního paprsku laseru je formulována pomocí módu. Mód vyjadřuje individuální kmity elektromagnetického pole rezonátoru, které je dané frekvencí a zvláštnostmi rozložení pole v rezonátoru. [19, 32]



Obr. 1.6 Schéma optického rezonátoru [15]

Budící zařízení

Tato část laseru udává pracovní režim laseru. Podle druhu laserového media se liší způsob buzení laseru. Plynné medium je prakticky vždycky buzeno elektrickým výbojem, pomocí stejnosměrného nebo střídavého proudu. Pevné laserové médium je většinou buzeno lampami resp. výbojkami. [19, 32]

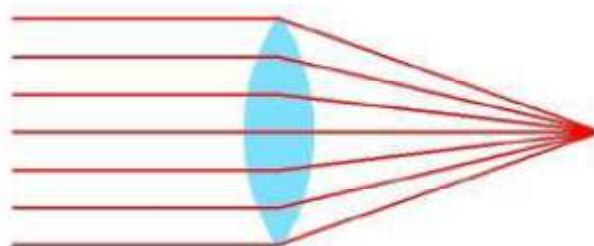
Chladicí zařízení

Chladicí zařízení odvádí nevyužitou energii, ze které nevznikne záření, ale tepelná energie. Chladicí zařízení se používá nejen k chlazení laseru, ale k ochraně probíhajícího procesu. V aplikacích se nejvíce používá jako chladicí medium voda. Vlastní chladicí okruh je složen ze dvou větví. Ve vnitřní větvi okruhem proudí deionizovaná voda. Ve vnější větvi je použita voda z vodovodní sítě, nebo ze speciálního zásobníku s čerpadlem. Výrobci laserových zařízení konstruují rovněž speciální chladicí zařízení, kde je vnitřní okruh chlazen vzduchem. [19, 32]

1.3 Vlastnosti laserového paprsku

Laserové záření je charakteristické těmito vlastnostmi: [4, 9, 10]

- Záření má jen jednu vlnovou délku – je monochromatické. Vzhledem k této vlastnosti je možné laserový paprsek soustředit do intenzivního úzkého bodového svazku (obr. 1.7).



Obr. 1.7 Fokuse laserového světla [9]

- Děj je periodický a probíhá bez fázových posuvů. V prostorově koherentním prostředí kmitají všechny částice světelné vlny se stejnou fází v rovině kolmé na směr šíření paprsku a v časově koherentním paprsku kmitají se stejnou fází všechny částice světelné vlny ve směru šíření paprsku. Děj má tedy velký stupeň prostorové a časové koherence.
- Malá divergence (rozbíhavost) svazku fotonů. Hodnota divergence je dána poloviční hodnotou vrcholového úhlu kuželu, který vystupuje z rovinného okénka laseru s průměrem $2r_0$.
- Má vysokou výstupní intenzitu záření I [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$]. Výstupní intenzita je definována jako energie připadající na jednotku plochy kolmou ke směru šíření svazku. U prvních laserů dosahovala výstupní intenzita $10^5 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, od 60. let minulého století se však vlivem vývoje zvýšila intenzita záření u nejvýkonnějších laserů až na hodnoty kolem $10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.
- Má módobou strukturu (TEM – „transverse electromagnetic mode“). V příčném průřezu paprsek vytváří buď jednoduchou stopu, základní mód, nebo složitější obrazce. Tyto obrazce mohou být buď pravoúhlé, nebo kruhově symetrické. Tvar módu je ovlivněn tím, že uvnitř laserového rezonátoru získává elektromagnetické pole

generované stimulovanou emisí záření určitou konfiguraci v závislosti na okrajových podmínkách rezonátoru. Největší hustoty energie při dané výstupní energii laseru lze získat pomocí laserů pracujících v základním módu označovaném TEM₀₀. Mód laseru určuje jeho možné použití např. pro průmyslové aplikace (např. svařování, řezání, aj.).

Tento soubor výše uvedených vlastností je velmi důležitý pro fokusaci laserového paprsku. Při laserovém ději se pomocí vhodné optické soustavy soustředí paprsek do malého bodu. V tomto bodě se koncentruje vysoká hustota energie, což má za následek natavení a odpaření materiálu, čímž se dosáhne požadovaného efektu zpracování. Patříčně fokusovaný paprsek pro řezání CO₂ laserem s výkonem do 1 kW má průměr okolo 0,3 mm a může dosahovat hustoty energie okolo 1,4 MW·cm⁻². V tab. 1.1 jsou pro porovnání uvedeny hodnoty hustoty energie, které je možné dosáhnout různými zdroji energie. [9]

Tab. 1.1 Porovnání laserové technologie s ostatními technologiemi [9]

Zdroj energie	Dosahovaná hustota energie [W·cm ⁻²]
Elektrický oblouk	1.10 ⁵
Kyslíkovo-acetylenový plamen	1.10 ⁴
Plazmový paprsek	1.10 ⁵
CO ₂ laser	1.10 ⁹
Nd laser	1.10 ¹⁴
Elektronový paprsek	4.10 ⁸

2 Druhy laserů

Základní rozdělení laserů je podle aktivního prostředí, které se používá na generování záření. Jako laserové aktivní prostředí je možné použít rozličné materiály v různých skupenských stavech. Vlastnosti materiálů aktivního prostředí se proto od sebe velmi výrazně liší, navíc matrice materiálů aktivního prostředí určuje technické vlastnosti laseru. Lasery lze dělit pomocí různých hledisek, nejčastěji se však používá rozdělení podle následujících kritérií uvedených v tabulce č. 2.1.

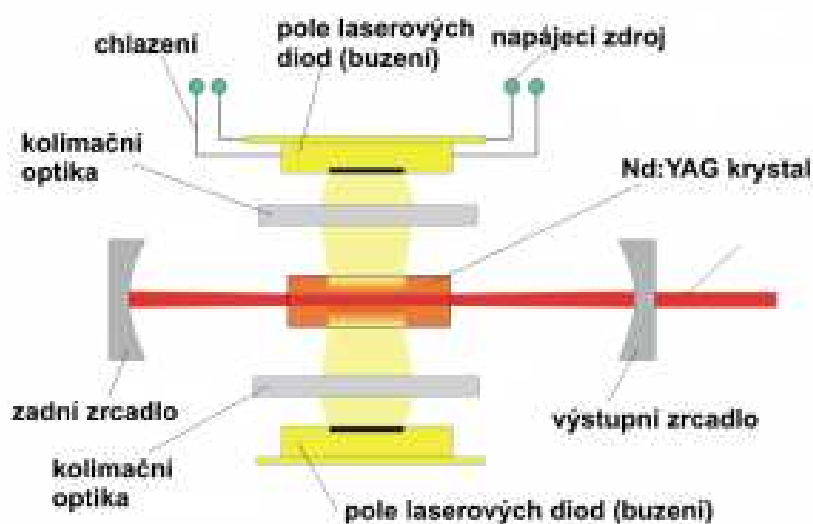
Tab. 2.1 Rozdělení laserů podle kritérií [1]

Kritérium	Druhy laserů
Skupenství aktivního prostředí	Pevnolátkové
	Polovodičové
	Plynové
	Kapalinové
Vlnové délky generovaného laserového paprsku	Infračervené záření
	Ultrafialové záření
	Rentgenové a gama záření
	Viditelné záření
Dosahovaného výkonu	Nízkovýkonové
	Vysokovýkonové
Způsobu čerpání energie	Elektricky
	Opticky
	Chemicky
	Termodynamicky
Konstrukce laserového zařízení	Systém pevného laseru a pohyblivého stolu, na kterém je upnutý obrobek
	Pohyblivý laserový systém a nepohyblivý obrobek
	Systém pohyblivého paprsku, který je zabezpečen zrcadly
Použití	Výzkumné
	Měřicí
	Lékařské
	Technologické
	Energetické
	Vojenské
Časového provozu	Kontinuální
	Pulsní
	Impulsní

2.1 Pevnolátkové lasery

Do této skupiny laserů lze zařadit lasery, jejichž aktivním prostředím je pevná opticky propustná látka - krystaly, oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, silikáty, tungstáty, molybdáty, vanadáty, beryláty, sklo a keramika. Základním materiálem aktivního prostředí je matrice, která musí být průhledná, opticky homogenní a je možné ji vyrábět uměle. Pro buzení se nejvíce používají výbojky nebo laserové diody. Tyto lasery mohou pracovat v rozdílných pracovních režimech. Výhodou je jejich stabilita a nízké náklady na výrobu. Mezi pevnolátkové lasery patří rubínový laser, vláknový laser, Nd:YAG laser, Nd:YLF laser a Er:YAG laser. [1, 9]

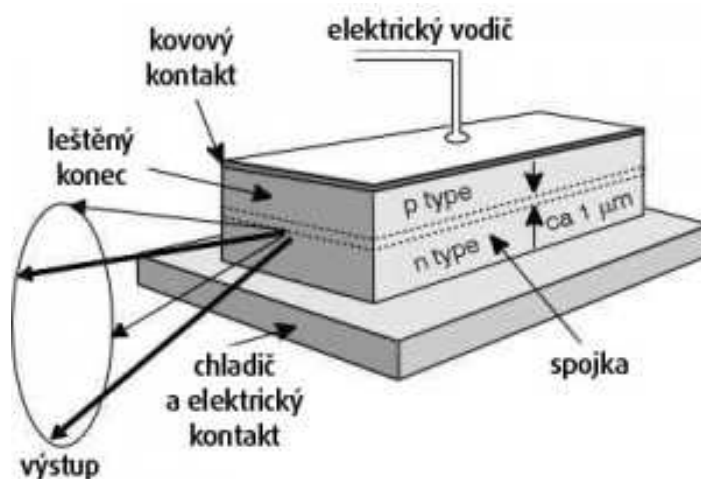
V současnosti jsou nejrozšířenějšími lasery tvořené neodymem (obr. 2.1). Nd:YAG laser je složen z pevného $Y_3Al_5O_{12}$ (ytrium/hliník/kyslík) izometrického krystalu, který obsahuje asi 1% iontů neodymu (Nd^{3+}). Laser pracuje jak v pulzním, tak kontinuálním režimu. Používá se pro vrtání, sváření, řezání a popisování. Kromě průmyslu se také používá v lékařství, např. kontinuální Nd:YAG laser jako skalpel v chirurgii a pulzní Nd:YAG laser v oční mikrochirurgii, další aplikace jsou v radarové technice a spektroskopii. [1, 6, 9]



Obr. 2.1 Konstrukce diodami buzeného Nd:YAG laseru [14]

2.2 Polovodičové lasery

„Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány.“ [32] Aktivní prostředí polovodičových laserů se budí převodem elektronů z valenčního do vodivostního pásu. Vlastnosti těchto pásů se upravují dopováním polovodičů vhodnými příměsemi. Jako zdroj buzení se nejčastěji využívá injektování proudu přes přechod PN polovodiče (obr. 2.2). Mezi výhody polovodičových laserů patří jejich kompaktnost, vysoká účinnost (až 50 %), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a na základě výběru aktivního prostředí generace záření různých vlnových délek. V průmyslu se tyto lasery používají hlavně pro svařování, tepelné zpracování a nanášení povlaků. [6, 30, 32]

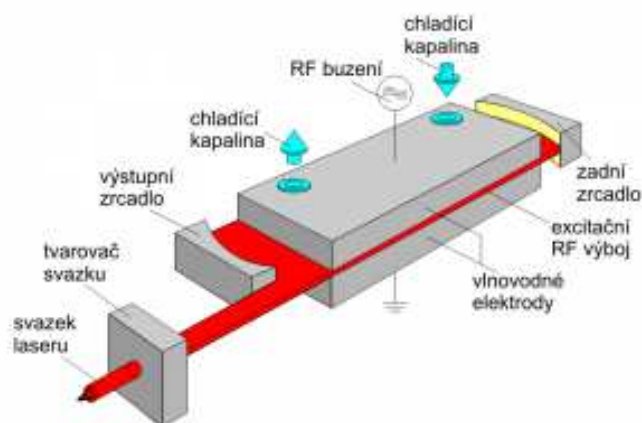


Obr. 2.2 Konstrukce polovodičového laseru [14]

2.3 Plynové lasery

Aktivní prostředí plynových laserů je tvořeno atomy, ionty nebo molekulami v plynné fázi. Do této skupiny patří helium-neonový laser, měděný laser, jódový laser, argonový laser, helium-kadmiový laser, vodíkový laser, dusíkový laser a CO₂ lasery. Plynové lasery pracují v kontinuálním nebo pulzním režimu. Pro excitaci těchto laserů se používá většinou elektrický výboj ve zředěném plynu, naproti tomu optická excitace je využívána méně často. Významným přínosem plynových laserů je jejich vysoká účinnost (CO₂ až 40 %) a vysoká kvalita paprsku. Nevýhodou je malý výkon, který lze získat z jednotky objemu aktivního prostředí. Plynové lasery musí být také účinně chlazeny, jelikož při provozu laserový plyn dosahuje vysokých teplot (200 – 300 °C). [1, 9, 20]

Z plynových laserů je nejpoužívanější laser na bázi molekuly CO_2 . Jedná se o plynový laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno molekulami oxidu uhličitého a je buzeno elektrickým výbojem. V klasickém konstrukčním uspořádání (obr. 2.3), je základ tvořen výbojovou trubicí s vnitřním průměrem několika cm naplněnou směsí plynů $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ v poměru 1:2:8 při tlaku několika kPa. Mezi výhody CO_2 laseru patří vysoký výkon, poměrně vysoká účinnost, kvalita laserového svazku. Nevýhody CO_2 laseru jsou vlnová délka, nutnost dopravit laserový paprsek do místa záření pomocí systému zrcadel. CO_2 zařízení je závislé na přívodu chladicí kapaliny a dodávce pracovní plynové směsi. Zařízení potřebuje rovněž nepřetržitou kontrolu a údržbu. V průmyslu se lasery s výkonem do 1,5 kW používají pro značení, gravírování a řezání nekovů (plasty, kůže, papír, skla, apod.) Dále pro řezání a svařování kovů (lasery s výkonem až do 20 kW). [1, 9, 14]



Obr. 2.3 Konstrukce CO_2 laseru [14]

2.4 Kapalinové lasery

Aktivním prostředím těchto laserů jsou roztoky různých organických barviv. Jedná se o ionty organických barviv v různých kapalných rozpouštědlech, jakými jsou např. voda, etylalkohol, metylalkohol, toluen, benzen, aceton, cyklohexan, glycerin aj. Nejvíce používaným aktivním prostředím barvivových laserů je Rhodamin 6G. Hlavní výhodou kapalných laserů je vysoká optická homogenita při velké koncentraci aktivační příměsi, což umožní získat velkou hustotu indukovaného záření a snížit vnitřní ztráty v aktivní látce. Nevýhodou kapalinových laserů je krátká životnost aktivního prostředí a její následný rozklad způsobený teplem a světlem. [20, 32]

3 Laserové obrábění

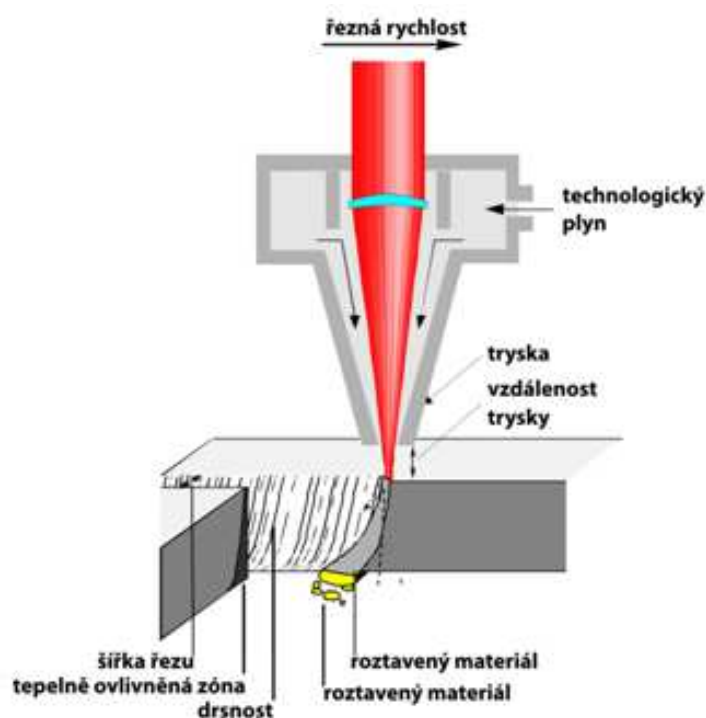
Laserové technologie mají v současnosti významné zastoupení v mnoha aplikacích od průmyslu po kosmonautiku. Vzhledem ke schopnosti zaměřit laserový paprsek do velmi malé plošky, je možné pomocí laseru účinným způsobem opracovávat různé typy materiálu. Ve strojírenských aplikacích se užívá při technologiích dělení materiálu, při obrábění, tepelném zpracování, svařování nebo tvorbě speciálních povrchových vrstev. Některé oblasti využití laserového paprsku ve strojírenství jsou uvedeny v tab. 3.1. [2, 7, 8]

Tab. 3.1 Rozdíly použití laserů [37]

Aktivní prostředí	Vlnová délka [nm]	Použití
Pevnolátkový rubínový	694	Kožní lékařství
		Vrtání kovů
Pevnolátkový Nd: YAG	1064	Zpracování kovů - svařování
		Medicína
Didodový GaAs	904	CD přehrávače
		Čtečky kódů
		Laserová ukazovátka
Plynový CO ₂	10600	Zpracování materiálů ve strojírenství
		Medicína - chirurgie
Plynový argonový	350 - 514	Medicína - oftalmofologie
		Medicína - dermatologie
Kapalinové lasery	580 - 690	Medicína - dermatologie

3.1 Laserové řezání

Laserové řezání je jednou z nejčtenějších laserových technologií v průmyslu. Podstata laserového řezání je tato: vysoká energie laserového záření je fokusována na malý bod obrobku, přičemž dochází k lokálnímu tavení nebo chemické degradaci do hloubky materiálu (obr. 3.1). [1]



Obr. 3.1 Princip laserového řezání [21]

Pomocí laseru lze řezat velmi malé otvory nebo tvrdé materiály vysokou rychlostí a při dobré kvalitě řezu. Pro řezání se nejvíce používají lasery Nd:YAG s výkony do 800 W a CO₂ lasery o výkonu do 3 – 4 kW, které mohou pracovat v kontinuálním i v pulsním režimu.

Při laserovém řezání jsou hlavním parametrem účinnosti celého procesu optické a tepelné vlastnosti materiálu, dále jakost povrchu. Leštěný materiál absorbuje méně světla než hrubý materiál. Naproti tomu tvrdost materiálu nemá vliv na proces řezání. Pomocí laserového řezání je možné opracovávat řadu různých materiálů, např. kovové materiály, nekovové materiály (dřevo, keramika) nebo materiály s malou tepelnou vodivostí. V případě řezání kovových materiálů se musí do místa řezu zavést plyn, nejvíce používaný je kyslík. Použitím kyslíku se zvýší tepelné účinky a urychlí se proces řezání. U nekovových materiálů se k odstranění roztaveného materiálu používá inertní plyn nebo vzduch. [21, 27]

Laserové řezání se podle způsobu řezání rozděluje na tavné a spalovací řezání. Základem tavného laserového řezání je odstraňování roztavené látky z místa řezu odfoukáváním pomocí inertního plynu. Pro tyto aplikace se používá argon nebo dusík a řezání se aplikuje především pro řezání kovových materiálů s teplotou tání nižší než teplota hoření. Tavné řezání se užívá pro řezání vysoce legovaných ocelí, slitin hliníku, polovodičových materiálů, ale také plastů a keramických materiálů. Oproti tomu

při spalovacím laserovém řezání laser zahřeje opracováváný materiál na zápalnou teplotu. Materiál se následně spálí v proudu přiváděného kyslíku. Plyn kromě spalování také odvádí vznikající oxidy. [9, 21, 27]

3.2 Laserové vrtání

Při této technologii vrtání se používá postup, kdy se postupně a rychle odstraňuje materiál z řezu, aniž by se zahřál nad odpařovací teplotu. Část materiálu, která se nachází uprostřed paprsku, je odpařena. Při aplikaci je tedy především odváděn materiál ve formě kapaliny, ale malé množství materiálu je odpařeno. [9]

Pro laserové vrtání se užívá pulzních laserů s vysokou energií pulzu jako např. lampami buzený Nd:YAG laser. Mezi výhody laserového vrtání patří tvorba velmi přesných a malých otvorů do průměru 10 až 100 μm . Laserové vrtání se používá pro vrtání kovů (např. vstřikovací trysky, proudové motory), také pro nekovové materiály (plasty, dřevo, papír, keramika aj.) Tvar vyvrtaného otvoru je typický svým vstupním kuzelem, ale je možné vytvořit i kruhové a tvarové otvory. Laserové vrtání patří mezi bezkontaktní procesy, při nichž je možné vytvářet otvory i na těžko přístupných místech obrobku. Základní metody laserového vrtání: [8, 11, 31]

- vrtání jednotlivými impulsy,
- nárazové vrtání,
- trepanační vrtání,
- spirálové vrtání.

3.3 Laserové svařování

Pomocí laserového svařování je možné svařovat materiály s vysokou teplotou tavení (W, Mo, Ta, Zr, Ti), ale také s vysokou tepelnou vodivostí (Cu, Ag, Al). V porovnání s laserovým řezáním a vrtáním požaduje laserové svařování nižší intenzitu laserového paprsku a větší délku laserového impulsu. S klesající hodnotou laserové energie, která se použije do svařovacího procesu, klesá množství deformace, kterým materiál podléhá. Laserem lze vytvářet hluboký a úzký svar s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Laserové svařování umožňuje rozmanité spojování nejen kovů, ale také vybraných druhů plastů. Vzhledem k vlastnostem laserového paprsku je možné svařovat rovněž materiály, jež jsou jinými metodami těžko svařitelné. Použité svařované součástky mohou být také

rozměrově rozdílné – přivaření tenkých drátků k tlustostěnnému obrobku, tenké fólie na tlustý plech. K dalším výhodám laserového svařování patří především vysoká rychlost, nízké vnesené teplo a s tím související i nízké deformace svařenců, bezkontaktní svařování, lokalizovaný ohřev a rychlé chladnutí, tichý provoz laseru, snadná automatizace procesu, absence kontaktu materiálu s elektrodou. Mezi příklady aplikací laserového svařování patří svařování kardiostimulátorů, kontaktů v elektronice nebo plechů v automobilovém a leteckém průmyslu. [11, 25, 31]

3.4 Laserové opracování povrchů

Laserová technika umožňuje ošetřit povrch za účelem zlepšení jeho odolnosti proti korozi a opotřebení. Použitím laseru je možné zvýšit tvrdost a houževnatost, měnit povrchovou strukturu nebo nanášet ochranné povlaky. Velkou výhodou laserového opracování povrchů je to, že mohou zpracovávat nepravidelné a trojrozměrné povrchy stejně snadno, jako rovinné a pravidelné povrchy. Mezi metody laserového opracování povrchů patří laserové kalení a značení. [11]

3.4.1 Laserové kalení

Povrchové kalení obecně je proces, při kterém rychlým ohřevem a následným prudkým ochlazením povrchu součásti dojde v této povrchové vrstvě k martenzitické transformaci a výsledkem je tak součást s měkkým houževnatým jádrem a tvrdým povrchem. Použitím laseru se zakalí pouze povrchová vrstva materiálu bez prohřátí a změn vlastností jádra, takže houževnatost jádra se vůbec nezmění. Laserové kalení se používá výhradně u železných materiálů, jejichž podíl uhlíku je větší než 0,2 %. Laserový paprsek zahřeje povrch materiálu na teplotu 900 – 1400 °C.

Výhodou laserového kalení je, že materiál zchladne sám (není potřeba žádné chladicí médium). Na rozdíl od klasického kalení, v němž je teplo odváděno povrchem součásti pomocí chladicího média. U laserového kalení naopak dochází k ochlazování od vnitřního studeného materiálu a odpadá tak použití kalícího média. Obvyklé hloubky prokalení bývají od 0,1 do 1,5 mm. Další výhodou laserového kalení jsou malé deformace součásti, takže mohou odpadat dodatečné náklady spojené s dodatečným obráběním. Pro laserové kalení se nejčastěji využívá výhod diodového laseru, který snadno vytváří požadovanou obdélníkovou ozařovací plochu s vhodným energetickým profilem. [4, 11]

3.4.2 Laserové značení

Při laserovém značení povrchu součásti vzniká popis během jediného kroku, a to za tepelného působení laserového záření. Metoda nevyžaduje žádné použití pigmentů a inkoustů. Značení laserem je souhrnný název pro několik operací: gravírování, žíhání, zpěnění a zbarvení. Podle kvality výsledného značení a druhu značeného materiálu se vybere nejvhodnější operace. [4, 11, 22]

- **Gravírování** – je založeno na principu tavení, odpařování, sublimace nebo případně rozpad vrchní vrstvy materiálu pomocí krátkých silných impulsů laseru. Hloubka gravírování se obvykle pohybuje až do 1 mm a lze gravírovat takřka jakýkoliv materiál.
- **Žíhání** – u některých kovů dochází při zahřátí ke změně barvy. Výsledná barva je závislá na teplotě, na kterou je kov zahřátý. Laserový paprsek zahřívá povrch materiálu, kde má vzniknout značení na určitou teplotu. Při zahřátí vzniknou na povrchu oxidační vrstvy, jež svými vlastnostmi určují barvu.
- **Zbarvení** – pro zbarvení plastických materiálů zahřívá laserový paprsek místo pouze lokálně. Některé materiály při zahřátí ztmavnou a jiné zesvětlí. Při zčernání vzniknou částice sazí.
- **Zpěnění** – při lokálním natavení povrchu materiálu laserovým paprskem vznikají v tavenině malé vzduchové bubliny, které zvětšují svůj objem. Vzniklé vzduchové bubliny pak odrážejí difúzně světlo a opracovaný povrch pak působí světlejším dojmem než okolí.

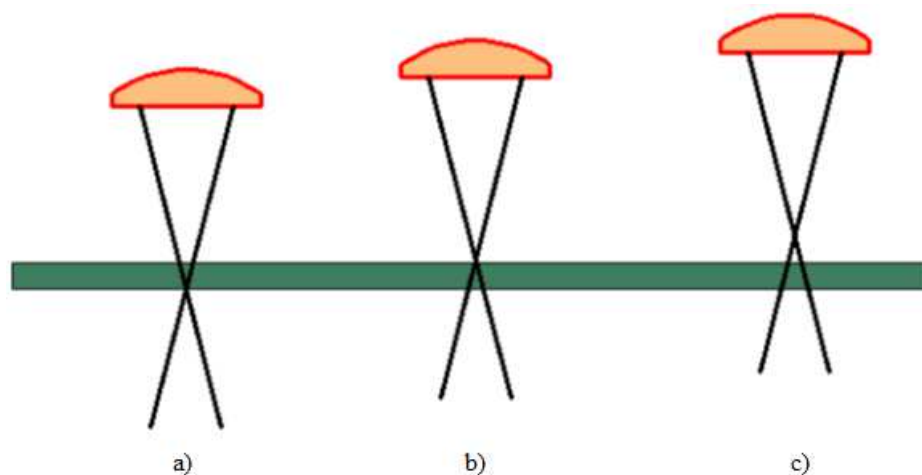
3.5 Parametry laserového řezání

Mezi klíčové parametry pro vlastní technologický proces patří: [3, 11]

- poloha ohniska ve vztahu k povrchové ploše obrobku,
- ohnisková vzdálenost optiky,
- výkon laserového paprsku,
- řezná rychlost,
- režim řezání a zapichování,
- průměr a geometrie trysky,
- transparence (propustnost) fokusační optiky,
- odstup trysky od plechu.

3.5.1 Poloha ohniska

Významným parametrem, který má vliv na konečnou kvalitu řezu, je striktní znalost polohy ohniskového bodu. Poloha ohniska (obr. 3.2) oproti obrobku se vybírá na základě materiálu a druhu řezání. Při tavném řezání se ohnisko lokalizuje ke spodní straně plechu, naopak u oxidačního řezání se volí poloha ohniska blízko u vrchní strany desky. Při sublimačním řezání je ohnisko na povrchu materiálu. [3]



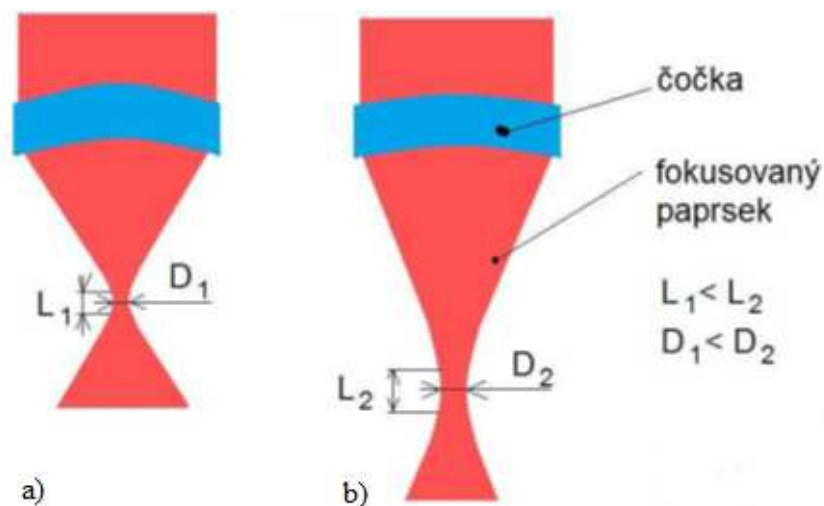
Obr. 3.2 Přibližná poloha ohniska při laserovém řezání

a) tavné řezání, b) oxidační řezání, c) sublimační řezání [3]

3.5.2 Ohnisková vzdálenost

Poloha ohniska vzhledem k materiálu, je jedním z parametrů ovlivňující množství tepla vneseného do řezu, šířku řezné spáry a jakost celé řezné hrany. V zásadě platí, že s rostoucí ohniskovou vzdáleností, se zvětšuje také průměr ohniska a Rayleighova délka (obr. 3.3). Rayleighova délka je shodná s hloubkou ostrosti.

Při oxidačním řezání se vychází z polohy ohniska na povrchu řezaného plechu a při tavném řezání bývá ohnisko zanořeno asi do dvou třetin tloušťky. [3, 11]



Obr. 3.3 Vliv ohniskové vzdálenosti na hloubku ostrosti a průměr ohniska

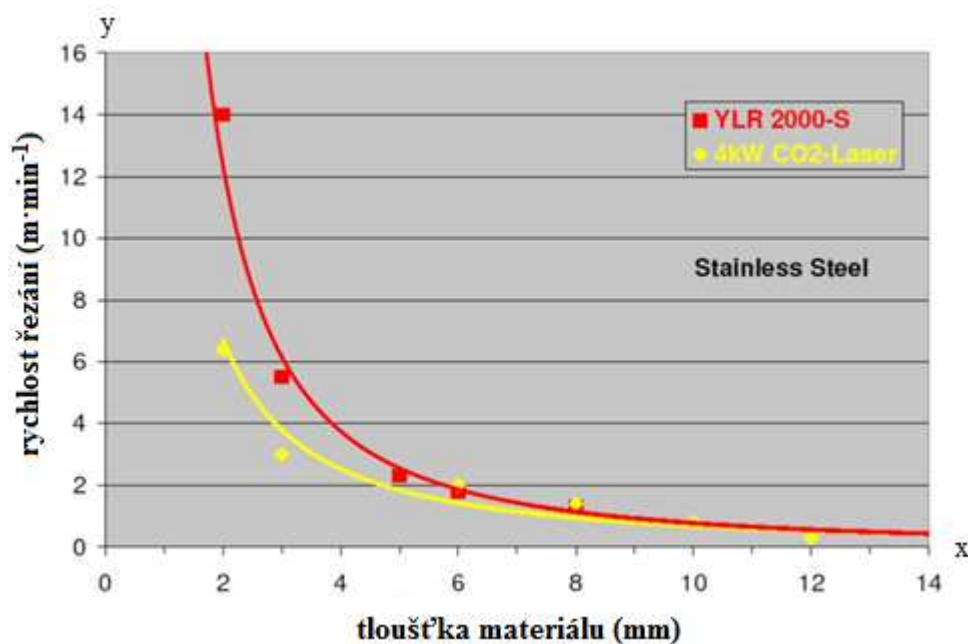
a) použití čočky s menší ohniskovou vzdáleností, b) použití čočky s větší ohniskovou vzdáleností [11]

3.5.3 Výkon laseru

Volba výkonu laseru závisí na druhu a tloušťce řezaného materiálu. Maximální tloušťka plechu pro laserové řezání se odvíjí především podle druhu materiálu, výkonu laseru a případně i druhu laseru. Obecně se uvádí korelace zvyšujícího výkonu laseru a maximální tloušťky řezání. Nesprávné zvolení řezného výkonu laseru s ohledem na další parametry řezání by mohlo způsobit výrazné zhoršení výsledné kvality řezu. [3, 11]

3.5.4 Řezná rychlost

Řezná rychlost je stejně jako výkon laseru uzpůsoben druhu a tloušťce řezaného materiálu (obr. 3.4). Pro vysoce kvalitní řezy musí být při řezání seřízena optimální rychlost řezání. Při zvolení příliš vysoké rychlosti nemusí dojít k požadovanému oddělení materiálu a naopak u nízké rychlosti může dojít k výraznému zhrubnutí řezu v důsledku vypalování materiálu. V zásadě platí, že s klesající tloušťkou materiálu je možné zvyšovat řeznou rychlost. Dalšími faktory ovlivňujícími řeznou rychlost jsou např. typ a výkon laseru, druh řezání nebo tlak řezného plynu. [3, 11]



Obr. 3.4 Srovnání řezné rychlosti v závislosti na tloušťce materiálu při řezání (vláknový a CO₂ laser) [21]

3.5.5 Režim řezání a zapichování

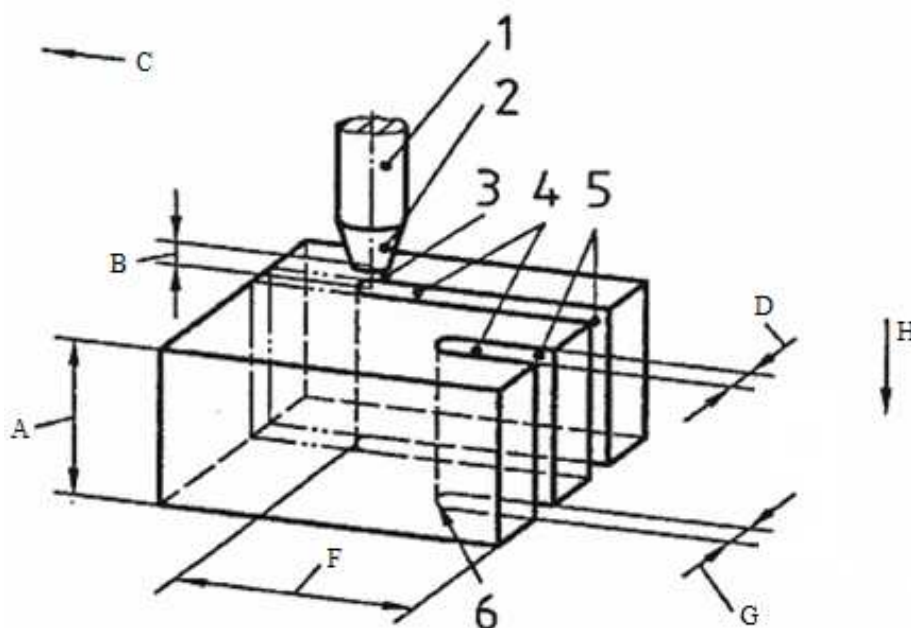
Řezání a zapichování se uskutečňuje v kontinuálním nebo v pulzním režimu. Výhodou pulzního řezání je možnost vytváření nesnadné a komplikované obrysy a žádoucích ostrých špiček bez rádiusů. Negativem při pulzním režimu je nízká rychlost řezání, vznikající hrubost řezu a tvorba oxidů na povrchu. Pomocí pulzního režimu zapichování je možné vytvořit malý a jemný startovací otvor. Tohoto jevu se využívá při řezání malých otvorů na součásti, nebo jestliže je požadováno vytvoření startovacího otvoru přímo na kontuře součásti. Kontinuální režim má v porovnání s pulzním režimem větší rychlost, vytváří se ale větší kráter a kov je více rozstříknut při zapichování. [3, 11]

3.5.6 Průměr a geometrie trysky

Geometrie a průměr trysky laseru souběžně s tlakem plynu ovlivňují výslednou kvalitu řezné plochy a tvorbu otřepů. Spotřeba řezného plynu je závislá na průměru trysky. Konvenční tryska má většinou kruhový otvor s kónickým průběhem. Na optimální aerodynamiku řezání působí také vzdálenost mezi tryskou a řezaným materiálem, která bývá obvykle od 0,5 do 1,5 mm. S klesající vzdáleností trysky od materiálu roste množství plynu vstupujícího do řezné spáry, zároveň dochází k většímu zahřívání, znečištění a opotřebení trysky. [3, 11]

3.6 Vyhodnocení kvality a vad laserových řezů

Řezání je první operace, kdy začíná proces výroby konkrétních dílů. V kovoprůmyslu a strojírenství se uplatňuje široká škála rezných technik. Termíny vztahující se k procesu řezání laserem jsou zobrazeny na obr. 3.5. Posuzování stavu povrchů a okrajů se provádí podle normy ČSN EN ISO 9013. Tato norma se týká charakteristických parametrů popisujících kvalitu povrchu materiálu po tepelném řezání. „Tato mezinárodní norma se používá pro materiály vhodné pro řezy laserem od 0,5 do 40 mm a zahrnuje geometrické požadavky na výrobky a úchytky jakosti povrchu řezu, který dosahuje hodnoty parametru Ra 3,6 až 12 μm a tloušťky tepelně ovlivněné oblasti od 0,05 do 0,2 mm.“ [12] Další normou vztahující se ke geometrickým vadám po laserovém řezání je ČSN EN ISO 17658, která nahradila již neplatnou normu ČSN EN ISO 12584, pojednávající o nepravidelnosti a úchytkách od požadovaného tvaru výrobku. [12, 40, 41]

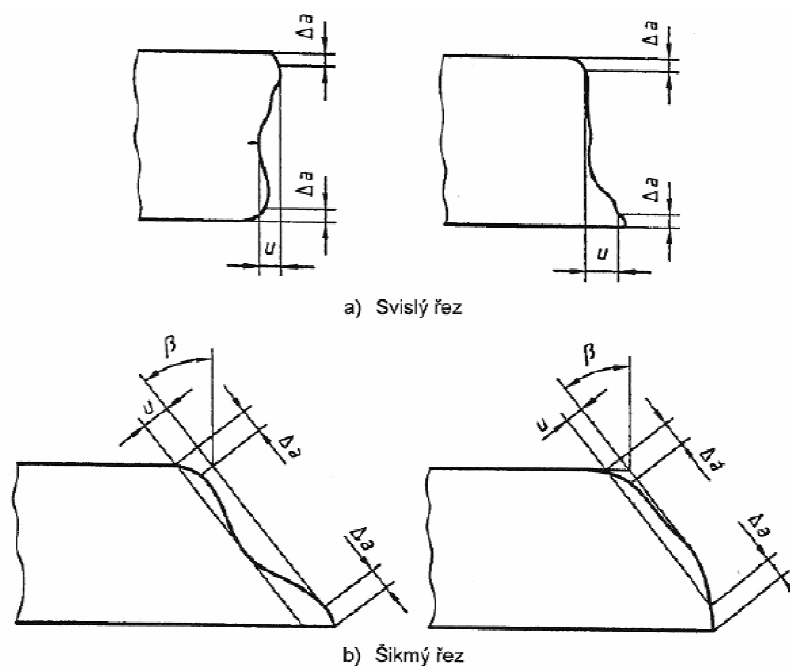


Obr. 3.5 Termíny vztahující se k procesu řezání

- 1) řezací hořák, 2) hořák, 3) svazek, 4) rezná spára, 5) počátek řezu, 6) konec řezu
A) tloušťka zpracovávaného kusu, B) vzdálenost trysky, C) směr posunu, D) šířka rezné spáry
E) délka řezu, F) šířka rezné spáry na spodní ploše, G) šířka rezné spáry, H) směr řezání [12]

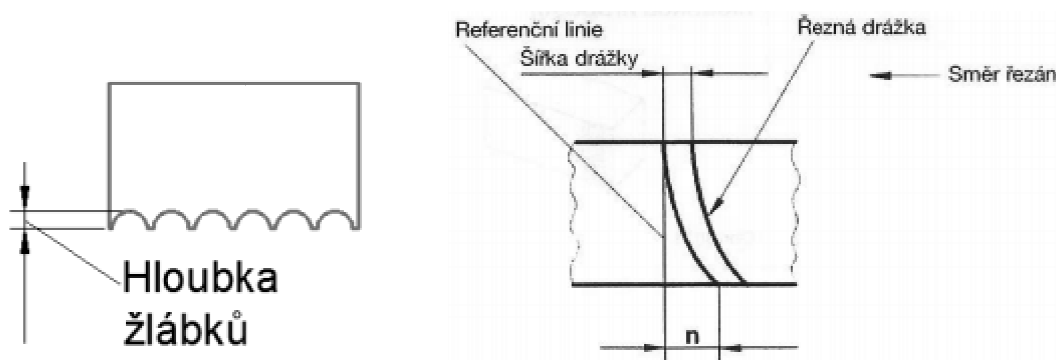
3.6.1 Veličiny určující kvalitu povrchu řezu - ČSN ISO 9013

- **Pravouhlost nebo úchylka úhlu** – jedná se o vzdálenost dvou paralelních přímek, mezi kterými musí ležet profil řezné plochy pod teoreticky správným úhlem, viz obr. 3.6. U svislých řezů tedy pod 90° . Toleranci pravouhlosti je možné měřit pomocí číselníkového úchylkoměru. [3, 40]



Obr. 3.6 Úchylka kolmosti nebo úchylky úhlů [12]

- **Doběh žlábků** - udává se největší vzdálenost mezi dvěma řeznými drážkami ve směru řezání, což je znázorněno na obr. 3.7. Mezi příčiny vzniku doběhu žlábků patří vysoká rychlost řezání, nízký výkon laseru nebo nízký tlak kyslíku. [3, 40]

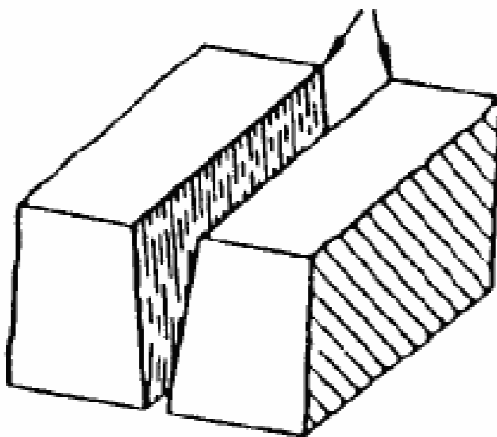


Obr. 3.7 Skluzová rýha [17]

- **Průměrná výška profilu** – „je aritmetický průměr z jednotlivých výšek prvků profilu na pěti za sebou následujících základních délkách.“ [12] Z důvodu souvislostí a prolínání se informací z jednotlivých norem je zde odkazováno na obr. 4.1.

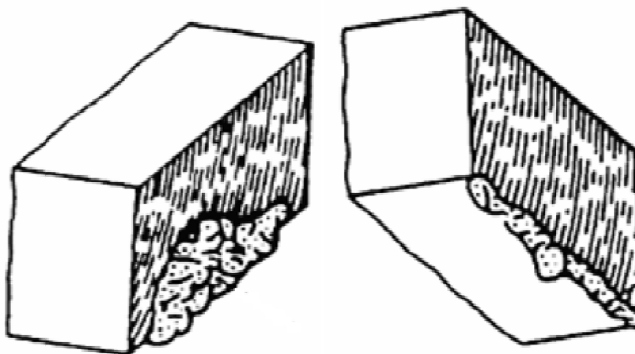
3.6.2 Veličiny určující vady řezu - ČSN EN ISO 17658

- **Řezná mezera** – při laserovém řezání dochází ke vzniku řezné spáry, která se obvykle zužuje od horní hrany řezu k dolní hraně řezu (obr. 3.8), což je způsobeno vysokou rychlostí posuvu. Velikost řezné spáry se udává v mm. Příliš velké řezné spáry vznikají v důsledku chybné polohy ohniska, znečištěné čočky a tepelného chování laserového paprsku v důsledku znečištěné optiky rezonátoru. [3, 41]

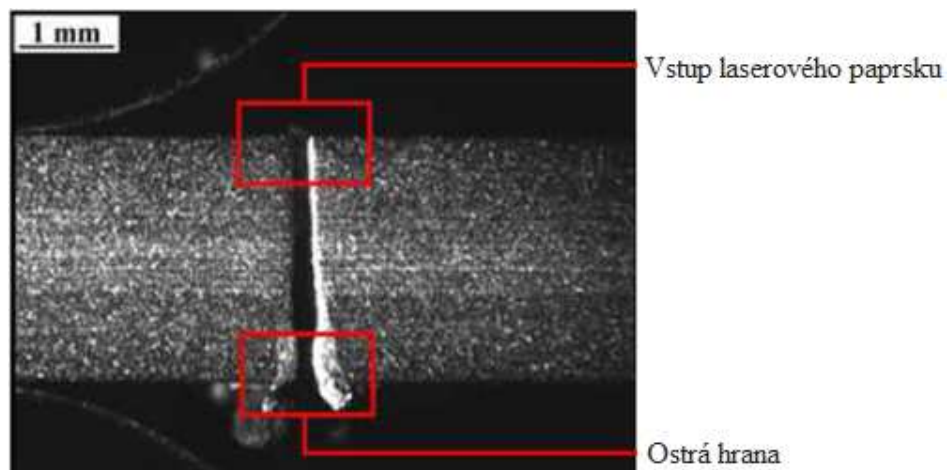


Obr. 3.8 Rozšíření spáry řezu [12]

Tvorba ostrých hran - většinou se jedná o silně přilnavé kovové výčnělky nebo o ulpělou struskovitou hmotu, obvykle na spodní straně řezu (obr. 3.9 a 3.10). Hrany kovových materiálů řezané laserem by neměly mít výskyt ostrých hran. Tímto tématem se ve své diplomové práci zabýval v roce 2010 Ing. Martin Grepl, Ph.D. [3, 5, 41]



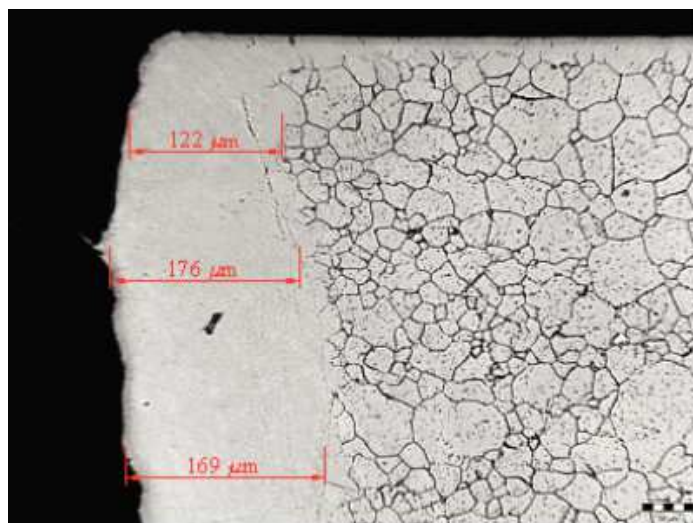
Obr. 3.9 Ulpívající struska [12]



Obr. 3.10 Detail řezu po metalografickém výbrusu (zvětšeno 10x)[5]

3.6.3 Tepelně ovlivněná oblast

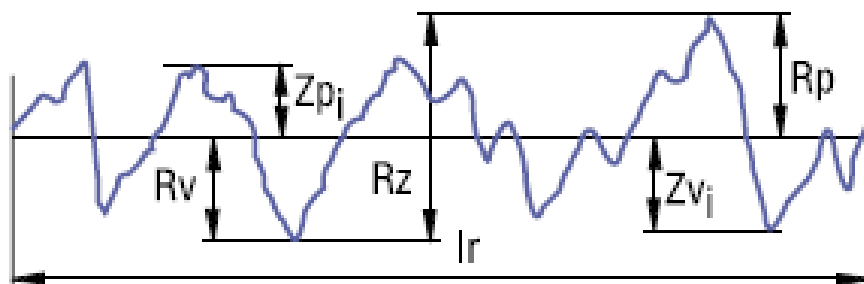
U tepelného laserového řezání dochází k tepelnému ovlivnění kolem místa řezu, čímž dochází ke změně struktury materiálu. Mezi důvody tepelného ovlivnění patří vysoký výkon laseru, nízká rychlost řezání anebo malý tlak plynu, tzn., že tato oblast je závislá na nastavení řezných parametrů stroje. Tepelně ovlivněná oblast (TOO) je součástí materiálu, jehož metalurgická struktura je ovlivněna teplem, ale není roztavena. Šířka TOO se zvyšuje s přírůstkem energie na jednotku délky a zvýšením tloušťky řezu. Příklad velikosti TOO u slitiny HS 188 tloušťky 1,27 mm je na obr. 3.11. Tepelné vedení v obrobku ovlivňuje jevy, jako je zjemnění zrna, tvorba karbidu a dalších nečistot ze sulfidu a fosfidu, které mohou existovat v důsledku legujících prvků, což vede k vytvoření zmiňované TOO. Touto problematikou se již zabýval ve své diplomové práci Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D. [3, 12]



Obr. 3.11 Šířka TOO [12]

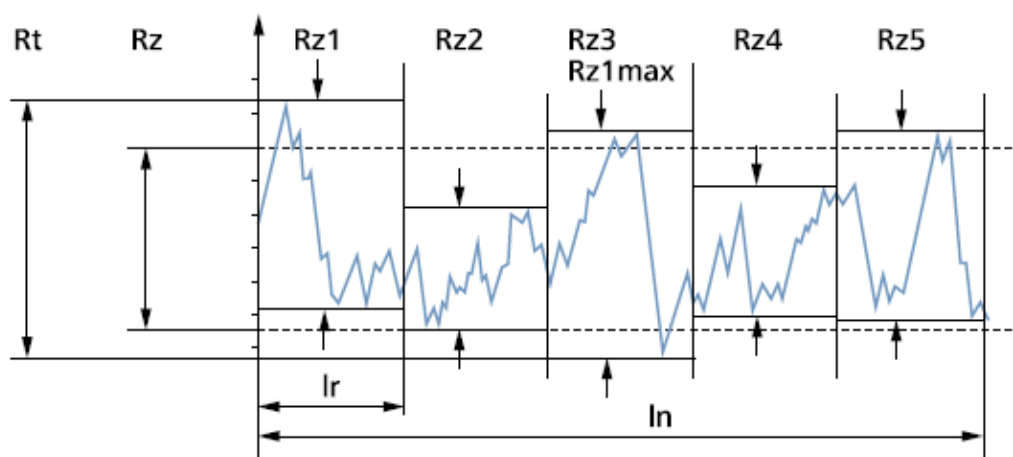
4 Drsnost povrchu a její měření

Drsnost povrchu je jeden z parametrů pro hodnocení celkové jakosti povrchu. Vztahuje se na ni norma ČSN EN ISO 4287 stanovující termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu profilovou metodou. Jedním z parametrů je průměrná aritmetická úchylka profilu R_a , která se určuje z aritmetického středu absolutních odchylek profilu drsnosti od střední čáry profilu uvnitř základní délky. [3, 39]



Obr. 4.2 průměrná aritmetická úchylka profilu [36]

Dalším z parametrů uvedených ve výše zmiňované normě je střední hloubka profilu, která je dána aritmetickým průměrem jednotlivých hloubek drsnosti pěti vzájemně sousedících reprezentativních samostatných tras měření. U neperiodických povrchů závisí vyhodnocovaná délka měřeného profilu na parametru R_a , který je nutné předem odhadnout. [39]

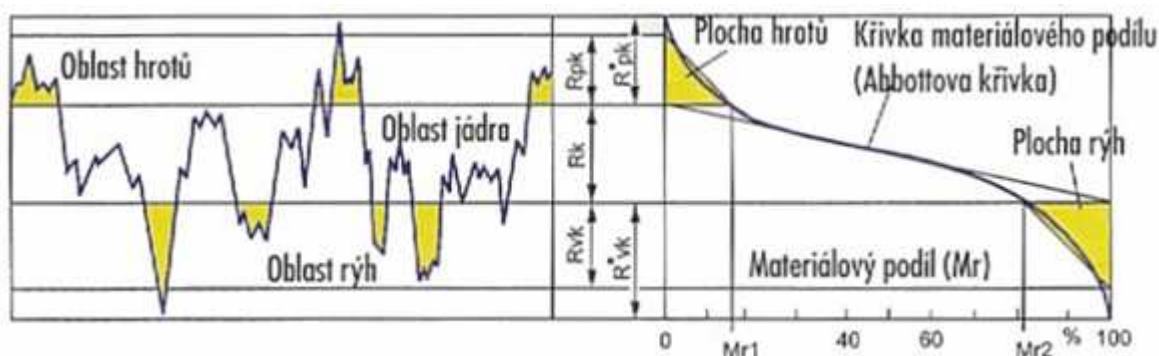


Obr. 4.2 Střední hloubka drsnosti [36]

Tab. 4.1 Základní délky drsnosti pro měření R_a , R_q a křivek odpovídající parametry pro neperiodické profily [39]

R_a [μm]	Základní délka l_r [mm]	Vyhodnocení délky l_n [mm]
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Materiálový podíl drsnosti povrchu vyjadřuje Abbotova křivka. Tato křivka se také nazývá materiálový poměr a udává poměr vzduchu v materiálu na libovolné úrovni. Aby tato křivka vycházela z profilu povrchu, je nanesena určitá vzdálenost od referenční čáry rovnoběžnou čarou, ze které je vyjádřen podíl součtu materiálových délek. Tato metoda se opakuje na celém profilu povrchu. Začíná od nejvyššího vrcholu k nejnižšímu profilu na měřené délce. Abbotova křivka udává podíl materiálu jako funkci výšky každého řezu od nejvyššího vrcholu. [28, 36, 39]

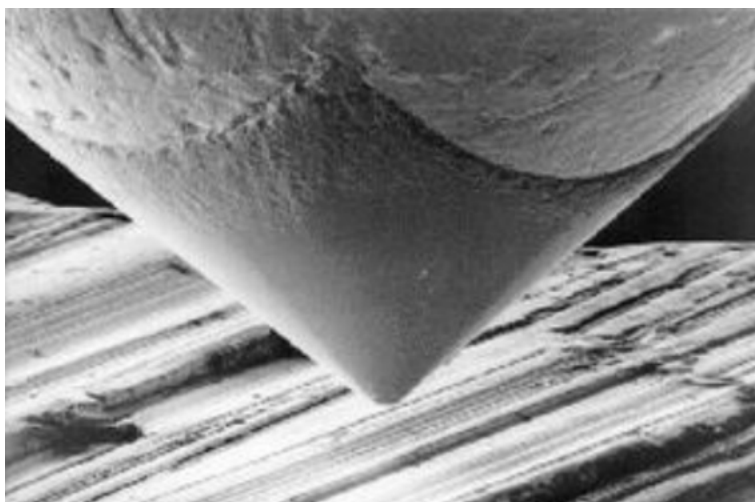


Obr. 4.3 Veličiny nosného podílu [28]

Hloubka drsnosti řezných ploch kovových obrobků je ovlivňována špatným tlakem plynu, řeznou rychlostí či výkonem laseru. Na základě funkčnosti ploch je na povrch výrobku kladen určitý požadavek drsnosti. Drsnost povrchu velmi výrazně ovlivňuje spolehlivost a životnost součástí. Proto je nezbytně nutné povrch kontrolovat a optimalizovat pomocí změn ve výrobě. Pro zjišťování hodnot parametrů drsnosti povrchu existuje řada metod. Nejrozšířenější je snímání povrchu dotykovou metodou, dále se používá i metoda bezdotyková. [3, 17]

4.1 Dotyková metoda měření drsnosti povrchu

Dotyková metoda je založená na snímání povrchu pomocí ostrého hrotu. Hrot se posouvá po povrchu a snímá tak nerovnosti povrchu. Změna výšky je následně zaznamenána v mnohonásobném zvětšení a vyhodnocena. Měření je prováděno nejčastěji dotykovým profilometrem. Ten je složen z mechanické a z elektronické části, která slouží k transformaci mechanického signálu generovaného snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál. Mechanická část se skládá z měřicího ramene, na kterém je na konci umístěn snímací hrot. Je důležité, aby hrot zůstal v neustálém kontaktu s měřeným povrchem, což zajišťuje přítláčná síla, dle normy ČSN EN ISO 3274, o velikosti $F = 0,00075 \text{ N}$. Změny výšky jsou zaznamenány ve tvaru profilografů nebo jsou převedeny na analogové změny napětí a indukčnosti. Ve srovnání s optickými metodami je výhoda v toleranci vůči znečištění. Snímací hrot dokáže odsunout malé nečistoty, nevadí mu olejová vrstva či průhledné materiály. Nevýhody jsou možná poškození povrchové vrstvy obrobku, protože měřicí hrot je vyroben z tvrdého materiálu (safír, diamant). Dle normy ČSN EN ISO 3274 je ideálním tvarem pro snímací hrot kužel s kulovou špičkou. Jmenovitý poloměr zaoblení špičky je $2\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ nebo $10\mu\text{m}$ a vrcholový úhel kužele je 60° nebo 90° . [3, 26, 38]

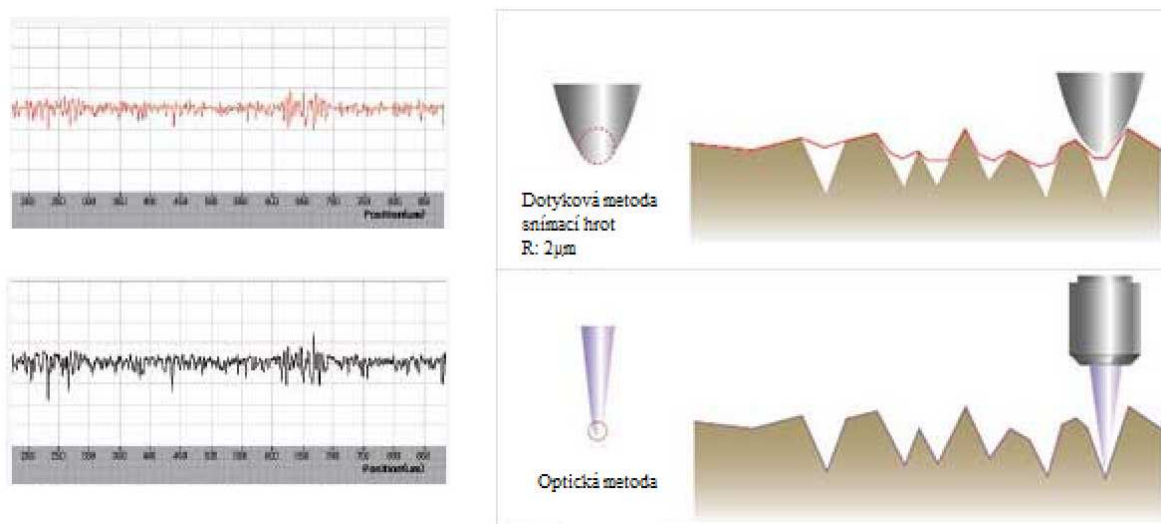


Obr. 4.4 Detail diamantového snímacího hrotu [26]

4.2 Metoda bezdotyková

Metoda bezdotyková (optická) je založena na promítnutí světelného paprsku na měřený povrch. Paprsek se od povrchu odrazí zpět nebo rozptýlí. Výhodou bezdotykových přístrojů je skutečnost, že měřicí zařízení nepřichází do styku s měřeným

vzorkem a tím nedojde k jeho poškození. Mezi další výhody patří, že není potřeba korekce měřicího hrotu a také možnost měření větších ploch. Nevýhodou bezkontaktních měřicích přístrojů je fakt, že může dojít k tzv. ztrátě dat (např. náhlou změnou profilu nebo v hraničních oblastech). Ztráta dat je způsobena tím, že se paprsek neodrazí správně zpět do detektoru a ten nenaznamená žádná data. Ke ztrátě dat může dojít i při měření ploch s nízkou odrazivostí. Naopak technologie bezdotykového měření drsnosti povrchu může měřit jemné nepravidelnosti, které konvenční měřicí přístroje nejsou schopny detekovat. Optické mikroskopy pro měření drsnosti jsou obvykle vybaveny vysokou citlivostí pro měření složitých a strmějších nepravidelností. Příklad použití optického mikroskopu včetně jeho popisu je uveden v experimentální části, viz kapitola 5.4. [3]



Obr. 4.5 Srovnání měření drsnosti pomocí dotykového pera (horní) a optické metody (spodní) [29]

5 Návrh experimentální práce

5.1 Popis cíle činnosti

Úkolem praktické části bakalářské práce bylo vyřezat 8 kusů vzorků na stroji značky Trumpf Trumatic L 3030 ve společnosti Alvey Manex a.s. zabývající se kovovýrobou a stavbou paletizačních linek. Všechny vzorky byly vyřezány ze stejného materiálu s rozdílnými tloušťkami 10 mm a 15 mm. Během řezání jednotlivých kusů byly měněny technické parametry laseru, a to: řezná rychlost, vzdálenost ohniska a tlak plynu. Výsledkem práce je zhodnocení kvality řezaného povrchu a vyhodnocení ideálních parametrů laserového řezu. Ke kontrole byla použita bezdotyková metoda měření na optickém mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5.

5.2 Zkoušený materiál

Pro testy byla zvolena měkká uhlíková konstrukční ocel ČSN 11 375 (EN 1.0038 nebo S235JR), jejíž vlastnosti jsou uvedeny v tab. 5.1. Ocel je dobře svařitelná, je často využívána pro svařované konstrukce. Ve společnosti Alvey Manex a.s. je konkrétně používána pro konstrukce rámců paletizačních linek, na které jsou následně osazovány další komponenty jako válečky nebo elektromotory. Tyto linky slouží jako automatický systém pro ovinování produktů na paletách, třídění a přepravě palet.

Tab. 5.1 Chemické rozdělení a mechanické vlastnosti materiálu ČSN 11 375 [34]

Chemické složení	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	N [%]
	≤ 20	≤ 1,4	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,55	≤ 0,012
Mechanické vlastnosti	Mez pevnosti R _m [MPa]	Mez kluzu R _e [MPa]	Teplota tavení [°C]	Hustota [kg·m ⁻³]	Kontrakce [%]	Tažnost [%]
	340	215	1450-1510	7850	31	21

5.3 Laserový stroj

Proces řezání byl realizován s použitím Trumpf Trumatic L3030 s maximálním výkonem 3,2 kW (obr. 5.1). Tento stroj je schopen řezat materiály až do tloušťky 20 mm. Součástí vybavení zařízení je možné objednat laser až do výkonu 6 kW. Tříosý systém

zajišťuje automatizované řezání a vrtání s vysokou přesností 0,05 mm, další technické parametry jsou uvedeny, viz tab. 5.2. Jako asistenční plyny se používá kyslík, dusík a argon. Správnou volbou plynu lze výrazně ovlivnit kvalitu obrobku, ale i produktivitu laseru. Další funkcí je ochrana optického systému laseru. Plynové láhve jsou zabudované do boxu zdroje. Pro řezání materiálu ČSN 11 375 byl použit asistenční plyn kyslík při nastavení různých tlaků od 50 do 80 kPa.



Obr. 5.1 Trumpf Trumatic L3030 [13]

Tab. 5.2 Technické parametry Trumpf Trumatic L3030 [37]

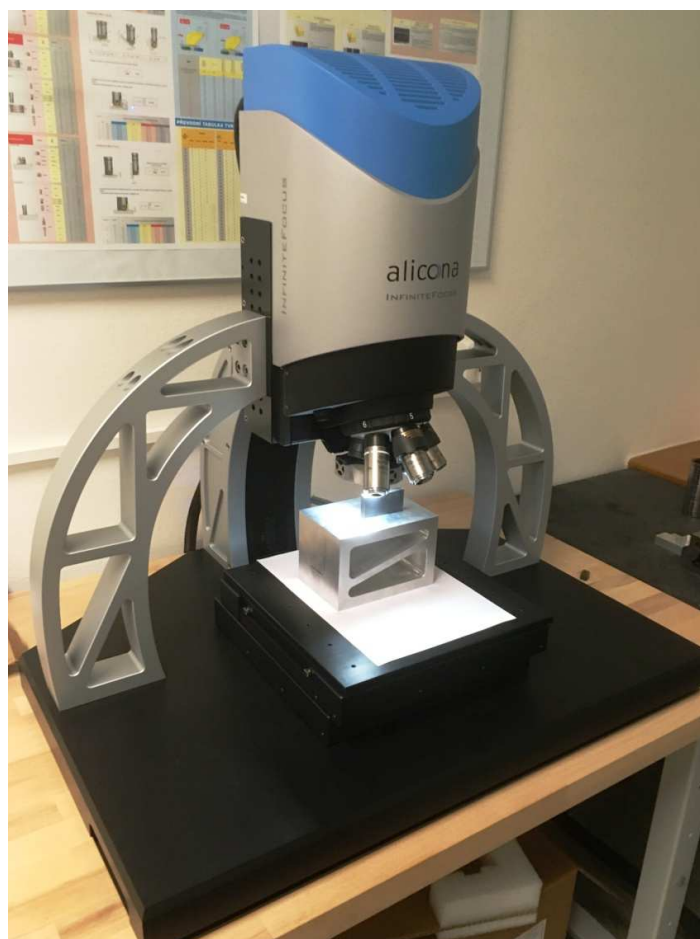
Pracovní rozsah	Osa X [mm]	3000
	Osa Y [mm]	1500
	Osa Z [mm]	115
Zatížení stroje	Maximální zatížení [kg]	710
Rozměry stroje	Délka [mm]	9300
	Šířka [mm]	4600
	Výška [mm]	2000
	Hmotnost [kg]	11500
Specifikace	Maximální výkon [W]	3200
	Vlnová délka [μm]	10,6
	Max. rychlost polohování [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	85
	Přesnost [mm]	± 0.05
Napájení	Napětí (střídavé) [V]	400 – 460
	Příkon [kW]	26 – 53
Maximální tloušťka řezaného materiálu	Konstrukční ocel [mm]	20
	Ušlechtilá ocel [mm]	12
	Hliník a jeho slitiny [mm]	10

5.3.1 Bezpečnost práce

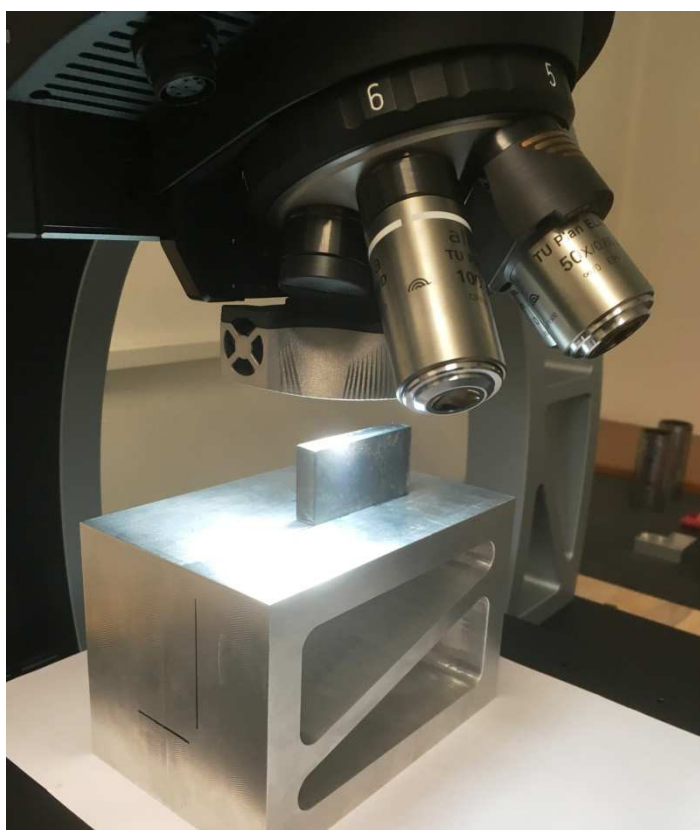
Bezpečnost práce je aspekt, který by neměl být opomenut na jakémkoliv pracovišti. Laserové zařízení Trumpf Trumatic L 3030 obsahuje zajištění vstupního prostoru k laseru. Jakmile jsou dvířka vstupu otevřena, laser je automaticky zastaven, aby nedošlo k poranění obsluhy. Dalším rizikem mohou být plyny používané pro řezání laserem z oceli, konkrétně dusík a kyslík. Ačkoliv samotné nejsou toxické, mohou být potenciálně nebezpečné a nebezpečí spojená s těmito plyny zahrnují dým. Je třeba dbát na to, aby se zabránilo vdechnutí par chromu, které vznikají při řezání korozivzdorných ocelí. Odtah výparů je vyžadován při řezání laserem, tudíž je většina systémů vybavena integrovanými systémy pro odsávání dýmů.

5.4 Optický mikroskop Alicona InfiniteFocus G5

Měření drsnosti povrchu probíhalo na optickém mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5 (obr. 5.2 a 5.3). Fungování mikroskopu je založeno na principu změny zaostření, které vertikálně skenuje povrch a průběžně získává data. Zaostřením pro každý povrch během procesu skenování je dosaženo výšky každého bodu. Kromě informace o výšce zařízení také poskytuje skutečné informace o barvě pro každý měřicí bod, který je registrován k údajům o výšce. Dalším důležitým aspektem v souvislosti s měřením povrchové struktury je to, že systém je schopen měřit i velmi strmé boky povrchu o 80°. Systém InfiniteFocus je vybaven objektivem s různým zvětšením od 2,5x do 100x. Při největším zvětšení lze dosáhnout vertikálního rozlišení až do 10 nm. Aby bylo možné pokrýt větší plochu povrchu, systém poskytuje schopnost šití na poli nebo obrázku. Při procesu sběru dat měří několik samostatných 3D datových souborů s nepatrným překrytím 10 % až 25 %, které se postupně prošívají na základě barvy a topografických informací a vytvářejí tak velkou mapu měření. [16]



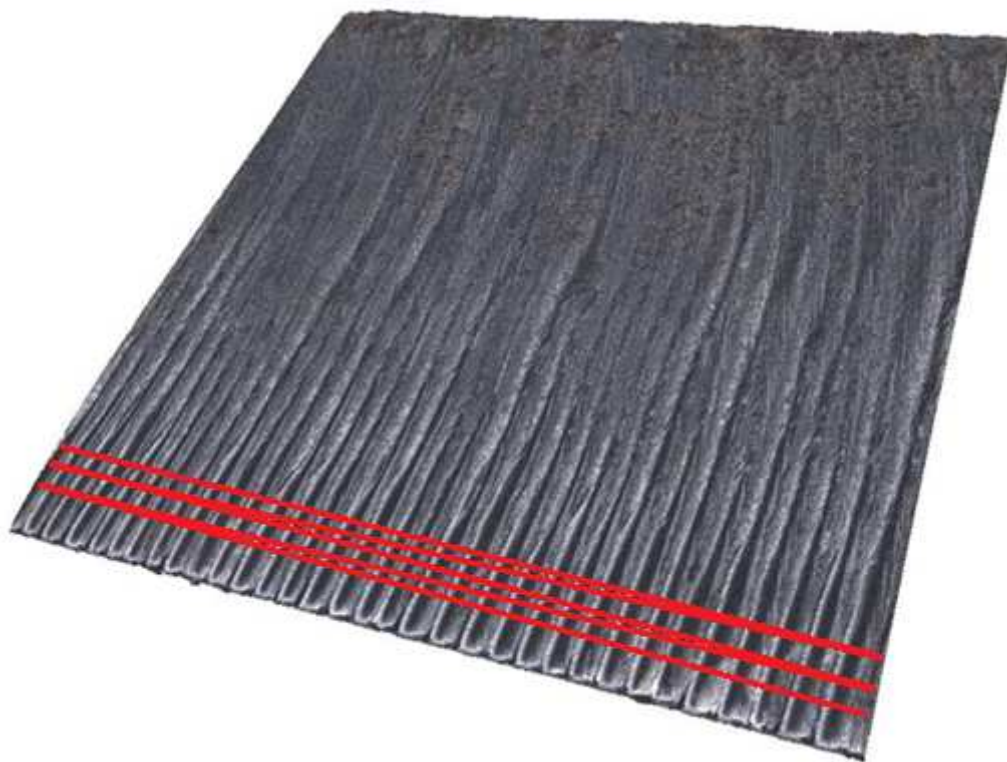
Obr. 5.2 Alicona InfiniteFocus G5



Obr. 5.3 Alicona – měření vzorku

5.5 Vyhodnocení vzorků

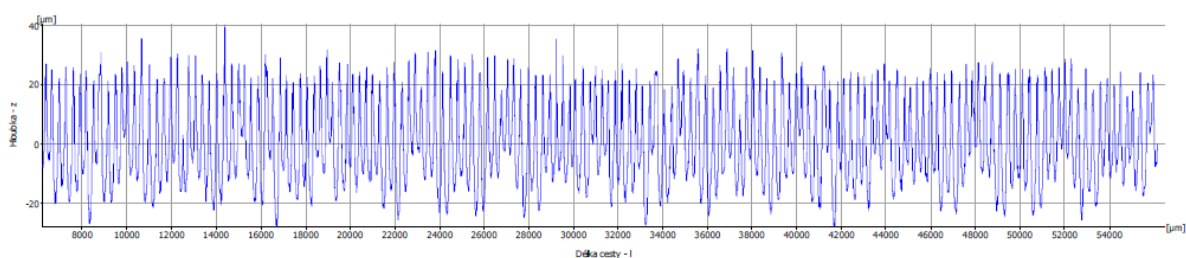
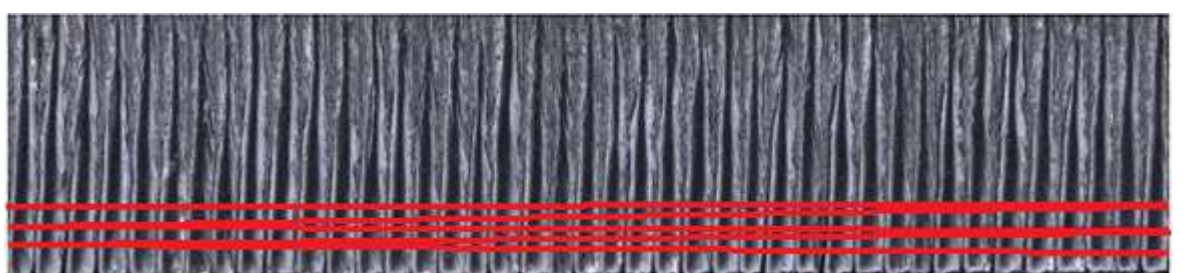
Po nařezání vzorků o velikosti 60 x 30 mm probíhalo měření řezané hrany bezdotykovou metodou na optickém mikroskopu Alicona InfiniteFocus G5. U jednotlivých vzorků probíhalo měření profilu, byly vyhodnoceny parametry profilu drsnosti a zobrazena Abbottova křivka, která je popsána viz kapitola 4, obr. 4.3. Při vyhodnocení byl brán ohled na normy uvedené v kapitole 4. Délka snímaného povrchu vychází z hodnoty Ra , která byla odhadnuta u všech vzorků přes 10 μm – následující hodnoty jsou vyčteny z tabulky 4.1. Vyhodnocení probíhalo v místě s největší drsností povrchu, viz obr. 5.5. Pro oddělení drsnosti a vlnitosti byl dle normy ČSN EN ISO 3274 použit filtr $\lambda_c = 8\text{ mm}$. Největší vliv na kvalitu řezané hrany měly nastavené parametry laseru při řezání jednotlivých vzorků, které jsou uvedeny v tabulkách 5.3 až 5.11.



*Obr. 5.4 Nasnímaný 3D model povrchu s přibližným znázorněním místa měření
u vzorku č. 1*

Tab. 5.3 Řezné parametry pro vzorek č. 1 – přednastavené parametry

Vzorek č. 1	Nastavené parametry stroje	
tloušťka 10 mm	Výstupní výkon [W]	3200
1	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]	1800
	Procesní parametry stroje	
	Tlak asistenčního plynu [kPa]	50
	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
	Poloha ohniska [mm]	1,5

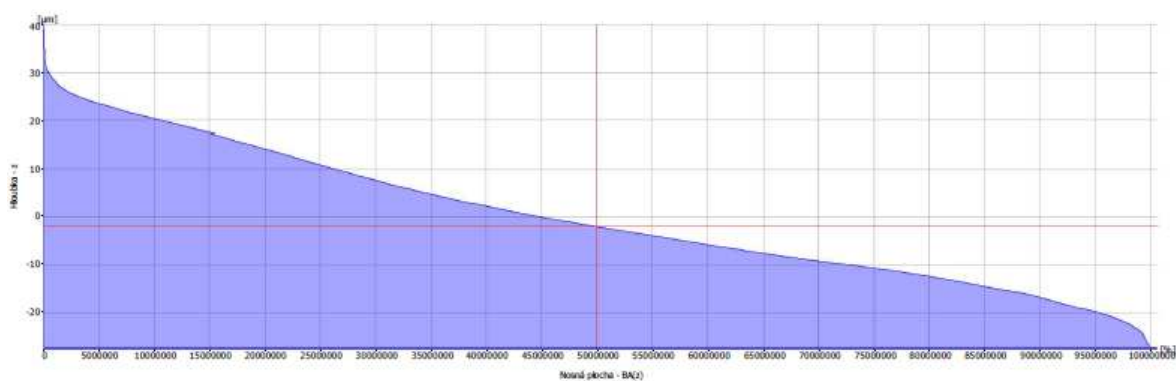


Ra: 11.5738μm

Rq: 13.7097μm

Rz: 60.6506μm

Obr. 5.5 Zvýraznění měřené oblasti (nahore), profil drsnosti (dole) u vzorku č. 1



Měřicí čára

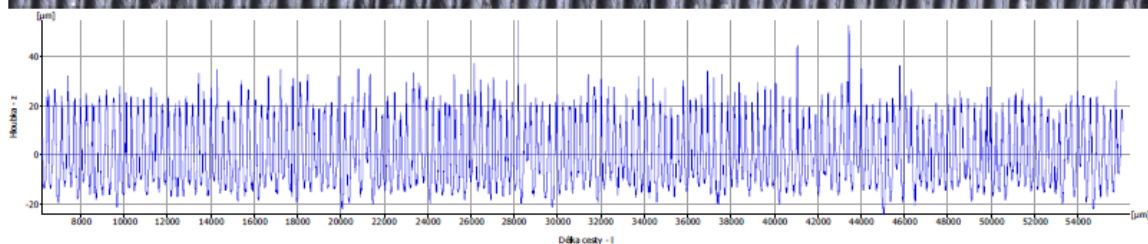
BA(z) [%] = 50.0000

z = -2.0277μm

Obr. 5.6 Abbottova křivka vzorku č. 1

Tab. 5.5 Řezné parametry pro vzorek č. 2

Vzorek č. 2	Nastavené parametry stroje	
2	tloušťka 10 mm	
	Výstupní výkon [W]	3200
	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]	1700
	Procesní parametry stroje	
	Tlak asistenčního plynu [kPa]	50
	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
	Poloha ohniska [mm]	1,6

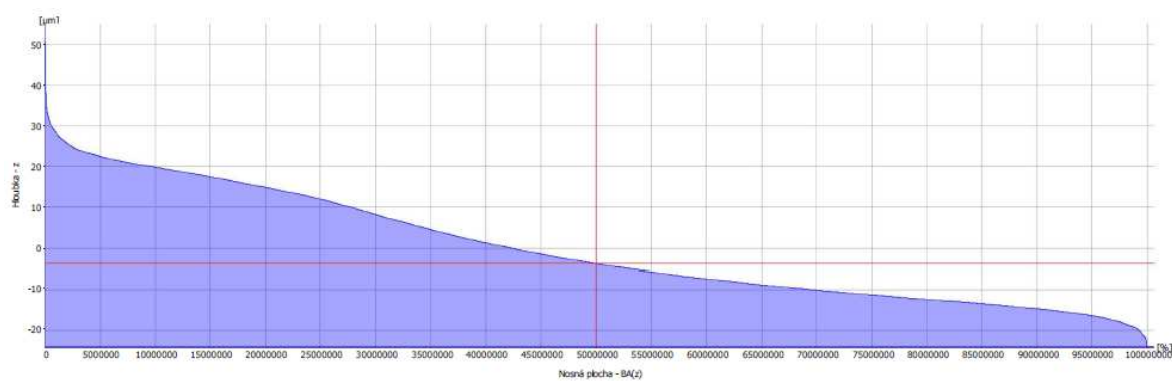


Ra: 11.5261μm

Rq: 13.2669μm

Rz: 64.2638μm

Obr. 5.7 Profil drsnosti u vzorku č. 2



Měřicí čára

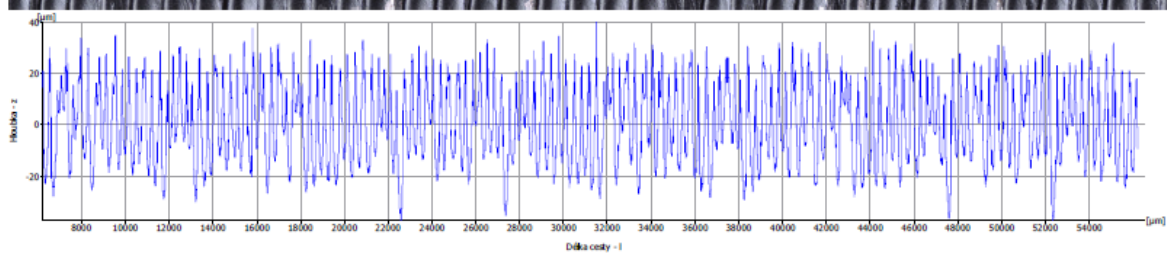
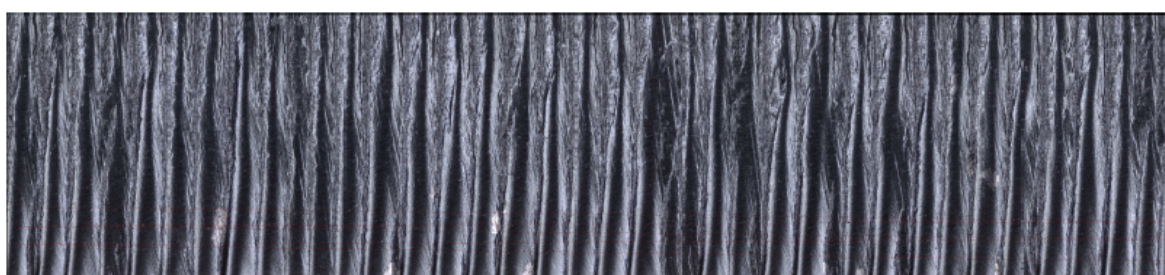
BA(z) [%] = 50.0000

z = -3.7761μm

Obr. 5.8 Abbottova křivka vzorku č. 2

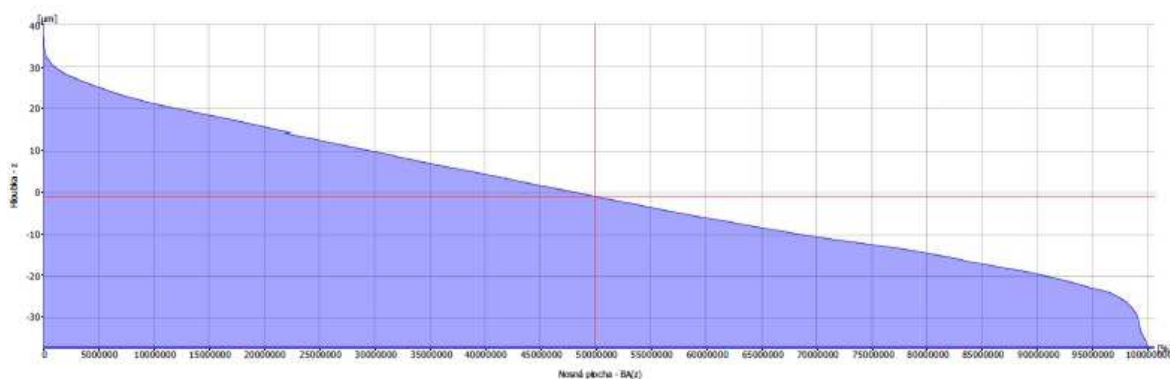
Tab. 5.6 Řezné parametry pro vzorek č. 3

Vzorek č. 3	Nastavené parametry stroje	
tloušťka 10 mm	Výstupní výkon [W]	3200
3	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]	2000
	Procesní parametry stroje	
	Tlak asistenčního plynu [kPa]	70
	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
	Poloha ohniska [mm]	1,7



$R_a: 13.0416\mu\text{m}$
 $R_q: 15.2655\mu\text{m}$
 $R_z: 69.8575\mu\text{m}$

Obr. 5.9 Profil drsnosti u vzorku č. 3



Měřicí čára

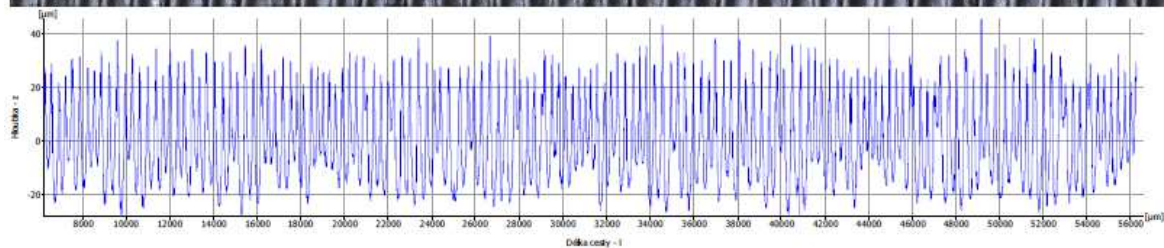
$BA(z) [\%] = 50.0000$

$z = -0.8739\mu\text{m}$

Obr. 5.10 Abbottova křivka vzorku č. 3

Tab. 5.7 Řezné parametry pro vzorek č. 4

Vzorek č. 4	Nastavené parametry stroje	
tloušťka 10 mm	Výstupní výkon [W]	3200
4	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]	1900
	Procesní parametry stroje	
	Tlak asistenčního plynu [kPa]	60
	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
	Poloha ohniska [mm]	1,8

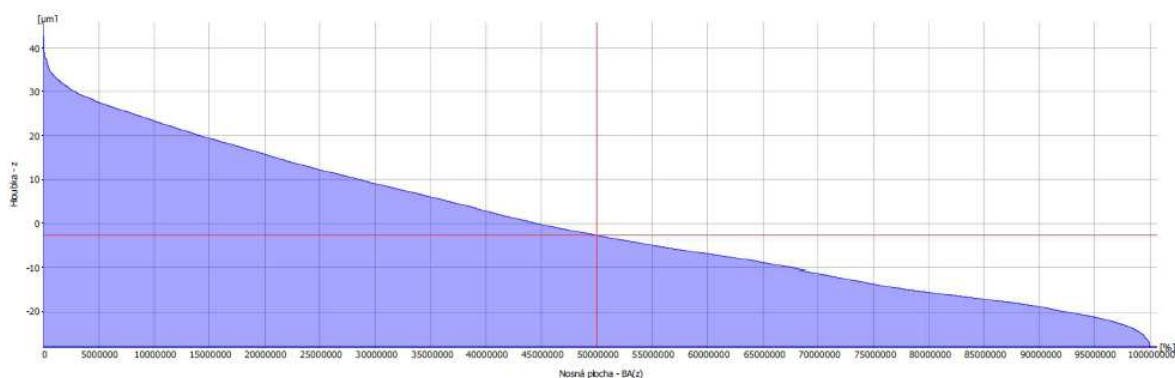


Ra: 13.3023 μ m

Rq: 15.5994 μ m

Rz: 67.9014 μ m

Obr. 5.11 Profil drsnosti u vzorku č. 4



Měřicí čára

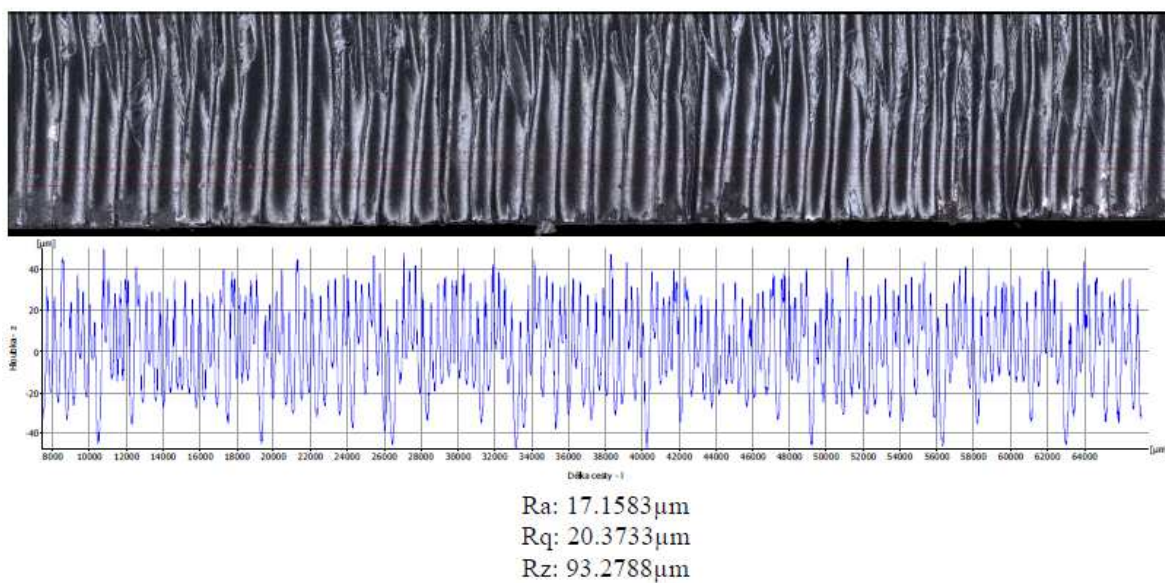
BA(z) [%] = 50.0000

z = -2.6739 μ m

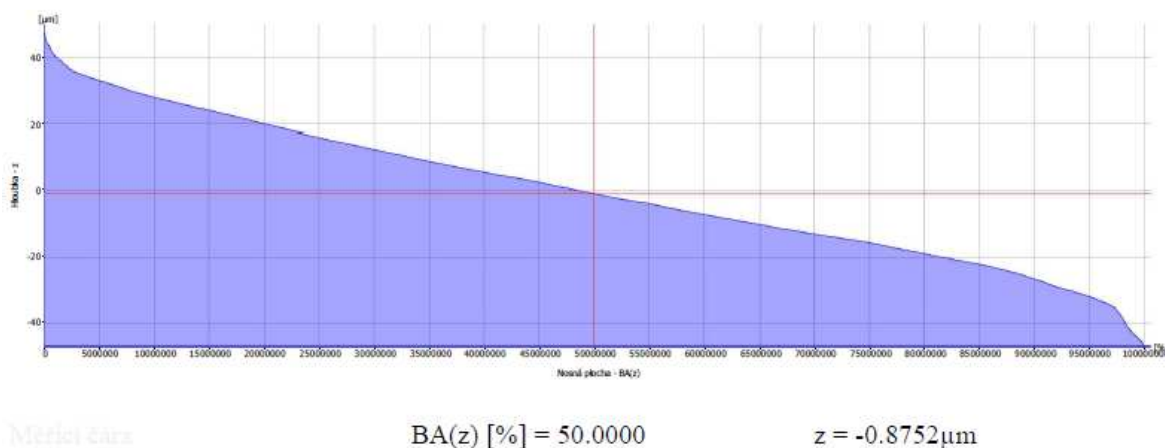
Obr. 5.12 Abbottova křivka vzorku č. 4

Tab. 5.8 Řezné parametry pro vzorek č. 5 – přednastavené parametry

Vzorek č. 5	Nastavené parametry stroje	
tloušťka 15 mm	Výstupní výkon [W]	3200
5	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]	1200
	Procesní parametry stroje	
	Tlak asistenčního plynu [kPa]	60
	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
	Poloha ohniska [mm]	1,6



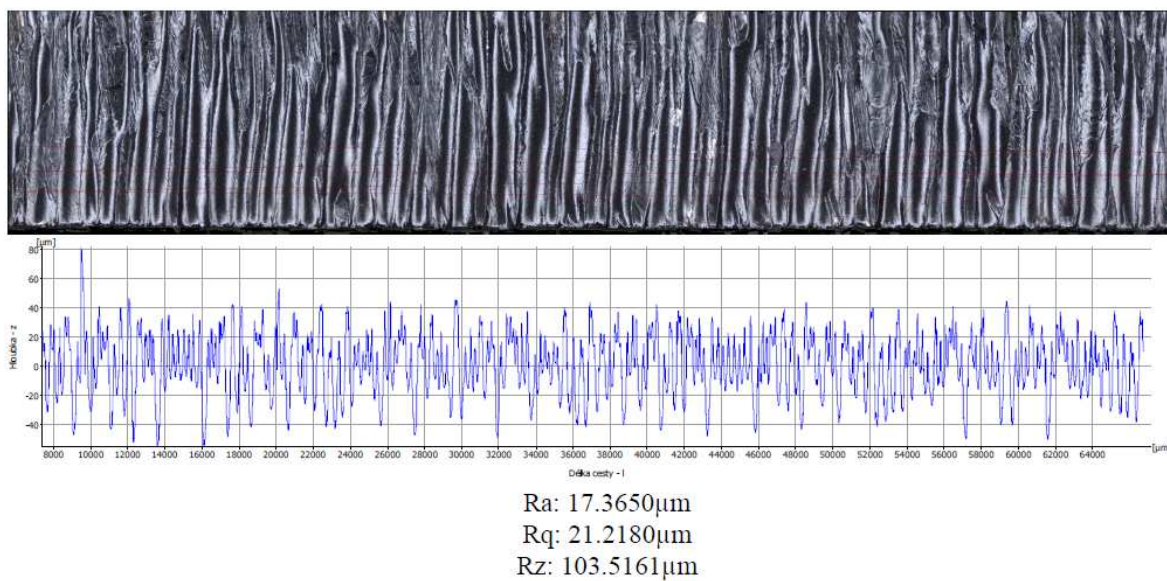
Obr. 5.13 Profil drsnosti u vzorku č. 5



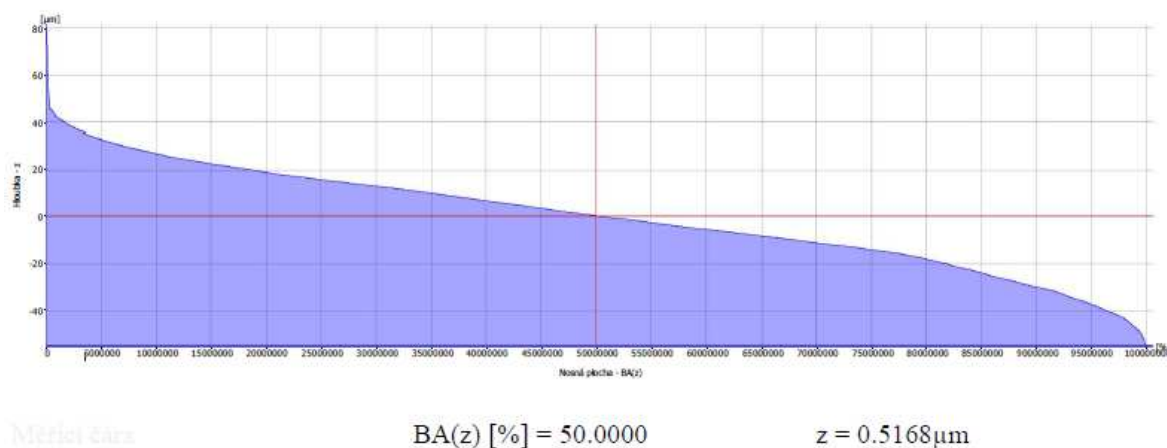
Obr. 5.14 Abbottova křivka vzorku č. 5

Tab. 5.9 Řezné parametry pro vzorek č. 6

Vzorek č. 6	Nastavené parametry stroje	
6	tloušťka 15 mm	Výstupní výkon [W]
		3200
		Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]
		900
		Procesní parametry stroje
		Tlak asistenčního plynu [kPa]
		70
		Vzdálenost trysky [mm]
		0,9
		Poloha ohniska [mm]
		1,7



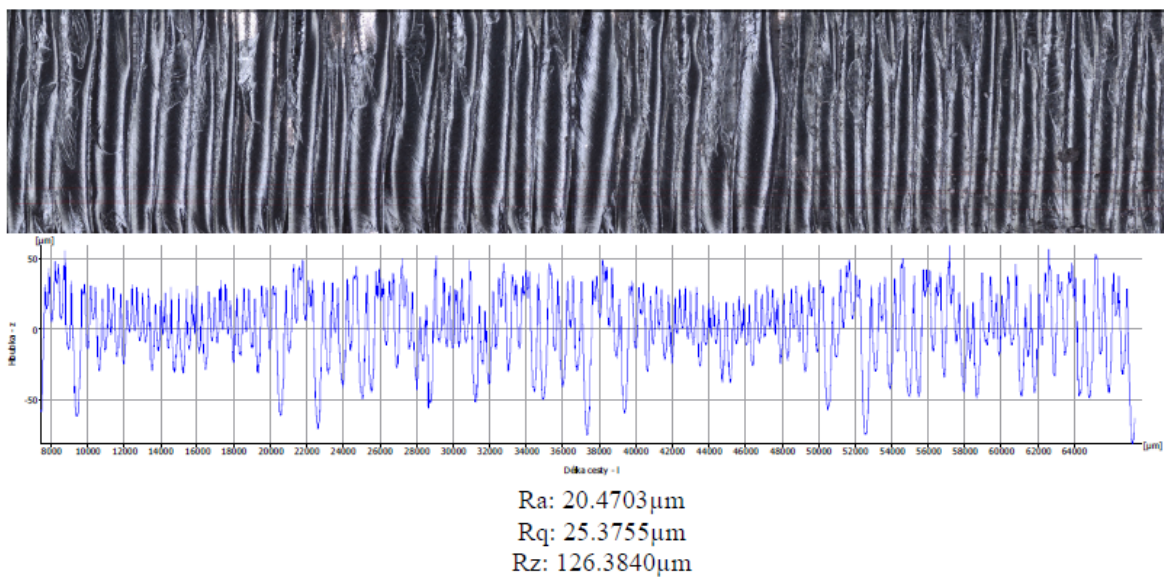
Obr. 5.15 Profil drsnosti u vzorku č. 6



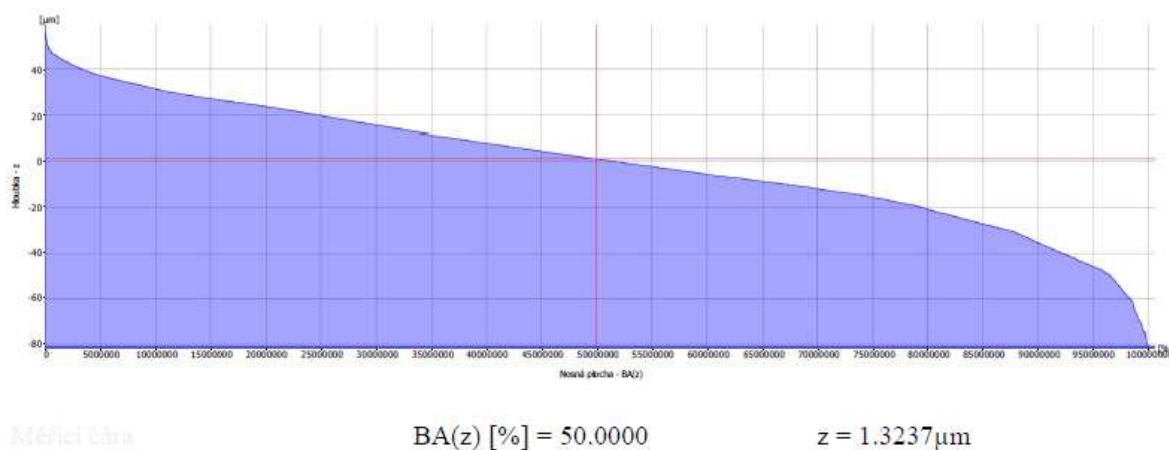
Obr. 5.16 Abbottova křivka vzorku č. 6

Tab. 5.10 Řezné parametry pro vzorek č. 7

Vzorek č. 7	Nastavené parametry stroje	
tloušťka 15 mm	Výstupní výkon [W]	3200
7	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]	800
	Procesní parametry stroje	
	Tlak asistenčního plynu [kPa]	80
	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
	Poloha ohniska [mm]	1,8



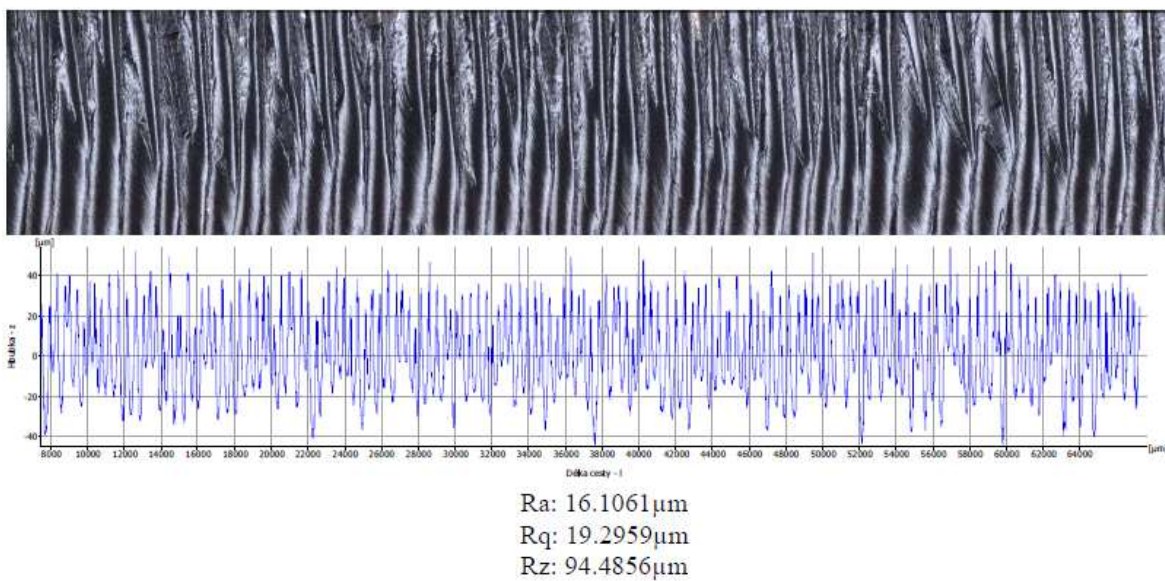
Obr. 5.17 Profil drsnosti u vzorku č. 7



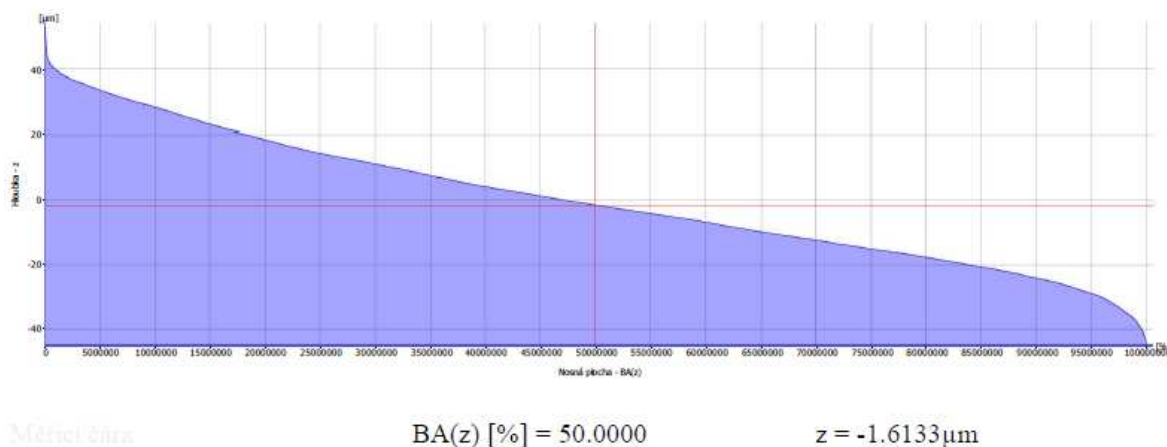
Obr. 5.18 Abbottova křivka vzorku č. 7

Tab. 5.11 Řezné parametry pro vzorek č. 8

Vzorek č. 8	Nastavené parametry stroje	
tloušťka 15 mm	Výstupní výkon [W]	3200
8	Rychlost posuvu [mm·min ⁻¹]	1400
	Procesní parametry stroje	
	Tlak asistenčního plynu [kPa]	60
	Vzdálenost trysky [mm]	0,9
	Poloha ohniska [mm]	1,4



Obr. 5.19 Profil drsnosti u vzorku č. 8



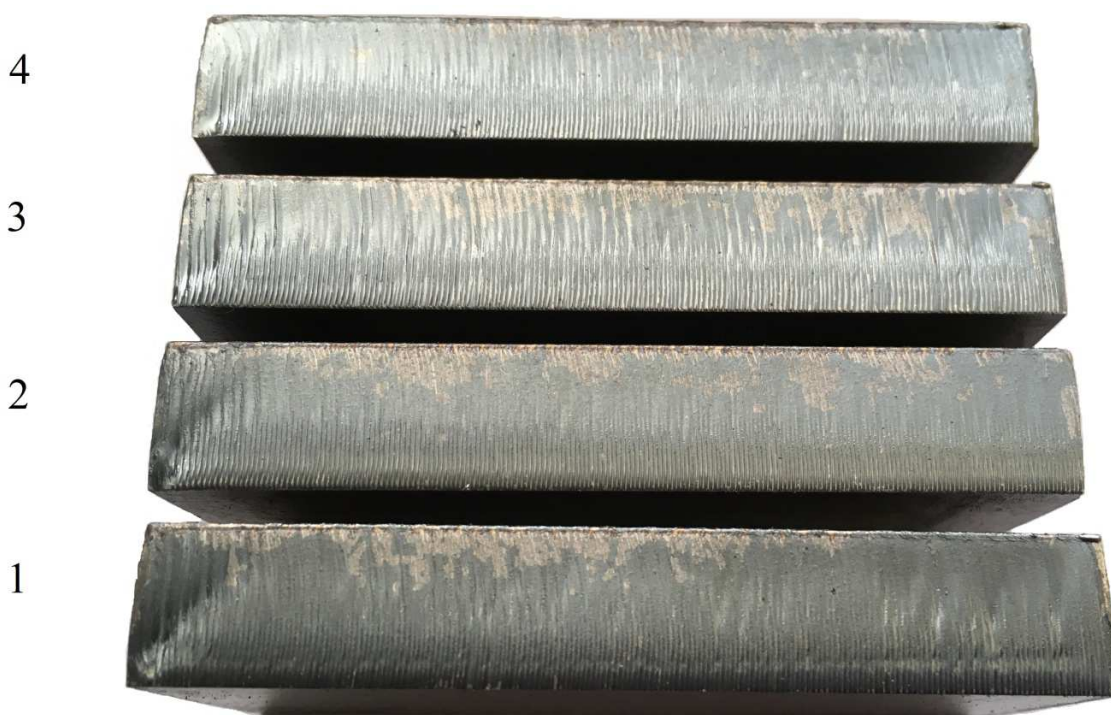
Obr. 5.20 Abbottova křivka vzorku č. 8

5.6 Zhodnocení naměřených výsledků

U prvních čtyř vzorků o síle materiálu 10 mm lze pozorovat srovnání v tabulce 5.12, ve které se objevily rozdíly ve výsledné drsnosti povrchu. U prvního vzorku byl stroj přednastavený tak, jak je obvykle využíván ve výrobě. Přijatelné výsledky jsou také u vzorku č. 2, u kterého byla nižší rychlost posuvu o $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a ohnisko bylo umístěno o 0,1 mm výš. Druhý vzorek má také nejmenší hloubku oblasti jádra nosného profilu, což znamená, že taková plocha je odolnější vůči opotřebení. U vzorků č. 3 a 4 byla nastavena vyšší rychlost posuvu a větší vzdálenost ohniska. To ovšem nepřináší žádná pozitiva ve výsledku, tudíž jsou řezné parametry použité na těchto vzorcích nevhodné.

Tab. 5.12 Srovnání vyhodnocených parametrů vzorků tloušťky 10 mm

Parametry	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4
Ra [μm]	11,57	11,53	13,04	13,30
Rq [μm]	13,71	13,27	15,27	15,60
Rz [μm]	60,65	64,26	69,86	67,90
Rk [μm]	36,23	26,60	46,38	39,92
Rpk [μm]	11,08	17,75	8,02	14,97
Rvk [μm]	4,95	3,43	8,43	3,21
z [μm]	- 2,03	- 3,78	- 0,87	- 2,67



Obr. 5.20 Vzorky tloušťky 10 mm

U vzorků tloušťky 15 mm je patrný mnohem větší rozptyl naměřených výsledků oproti tenčím vzorkům. Posuvové rychlosti byly u těchto vzorků nižší z důvodu větší tloušťky materiálu. Vzorek 5 byl opět řezán na přednastavených, běžně používaných parametrech ve výrobě pro tento materiál. Dle výsledků usuzuji, že zde by bylo vhodnější použití řezných parametrů nastavených pro vzorek č. 8. U tohoto vzorku byla použita o $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ vyšší rychlost posuvu oproti vzorku č. 5, což by i zefektivnilo výrobu z hlediska časové úspory. Nastavené parametry použité na vzorcích 6 a 7 lze považovat za nevhodné. Především u vzorku č. 7 byl nastaven velký tlak plynu, a to 80 kPa a nízká rychlost posuvu $800 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, což zapříčinilo nekvalitní provedení řezu.

Tab. 5.13 Srovnání vyhodnocených parametrů vzorků tloušťky 15 mm

Parametry	Vzorek č. 5	Vzorek č. 6	Vzorek č. 7	Vzorek č. 8
Ra [μm]	17,16	17,37	20,47	16,11
Rq [μm]	20,37	21,22	25,38	19,30
Rz [μm]	93,28	103,51	126,38	94,49
Rk [μm]	61,29	59,72	67,47	54,34
Rpk [μm]	10,30	13,89	11,54	14,08
Rvk [μm]	11,70	17,12	29,90	9,96
z [μm]	- 0,88	0,52	1,32	- 1,61



Obr. 5.21 Vzorky tloušťky 15 mm

Závěr

Bakalářská práce pojednávala o technologii řezání laserem, což je obráběcí proces, ve kterém je odstranění materiálu dosaženo zaostřením vysoce intenzivního laserového paprsku na obrobek. Tato technologie je v průmyslu velmi rozsáhlá. To je dáno zejména schopností laserů vykonávat kvalitní řezy při přiměřené výrobní rychlosti. Výroba laserů a laserových systémů pro zpracování materiálů se v posledních několika letech neustále vyvíjí kvůli svým ekonomickým výhodám, jako je vysoká kvalita, vysoká produktivita, úspora při zpracování materiálu a minimální ztráta základního materiálu. Nevýhodou jsou vysoké vstupní náklady na pořízení stroje.

Práce také zahrnuje problematiku vyhodnocení drsnosti povrchu po laserovém řezání. Drsnost je měřítkem jemných nepravidlostí povrchu. Správná funkce vyrobené součásti je kriticky závislá na stupni nerovností. V případě laserového řezání je kvalita řezané hrany závislá na nastavených parametrech stroje, což bylo odzkoušeno v rámci experimentu. S rozdílným použitím parametrů jako je řezná rychlost, vzdálenost ohniska a tlak plynu. Odlišné nastavení stroje se jasně odrazilo v kvalitě vyhotovených vzorků, které byly po vyhodnocení optickou metodou následně srovnávány.

Jak je vidět u prvních čtyř vzorků o síle materiálu 10 mm jsou rozdíly mezi jednotlivými vyhodnocenými parametry drsnosti mnohem menší než u vzorků o síle 15 mm. Z tohoto se dá usoudit, že tloušťka materiálu výrazně ovlivňuje kvalitu řezu. Ovšem vždy záleží na výkonnosti použitého laserového zařízení. Nastavení řezných parametrů vždy vycházelo z přednastavení stroje užívaného pro konkrétní materiál. U vzorků tloušťky 10 mm to bylo dle výsledků vhodné řešení z hlediska kvality povrchu a rychlosti řezání. U vzorků síly 15 mm by bylo dle srovnání naměřených výsledků drsnosti povrchu vhodnější použít odlišné parametry, konkrétně řezné parametry použité na vzorku č. 8. Tím by byla dosažena lepší drsnost povrchu, ale také vyšší rychlost řezání, čímž by se výroba zefektivnila.

Seznam použité literatury

- [1] BENKO, B; FODREK, P; KOSEČEK, M; BIELAK, R. *Laserové technologie*. 1. vyd. Bratislava: Tlač Vydavateľstvo STU v Bratislave, 2000, 9, 12-16, 31-37, 65 s. ISBN 80-227-1425-9.
- [2] CARISTAN, Ch. L. *Laser cutting guide for manufacturing*. 1th ed. Michigan: SME, 2004, p. 7. ISBN 978-0-87263-686-6.
- [3] DRÁBEK, M. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů*. Bakalářská práce. VÚT Brno, 2012, 30-32 s.
- [4] DUŠEK, P. *Aplikace laseru při obrábění dřeva*. Diplomová práce. VUT Brno, 2013, 16 s, 30-33 s.
- [5] GREPL, M. *Obrábění laserem materiálů s proměnlivou tloušťkou*. Diplomová práce. VŠB Ostrava, 2010, 50 - 61 s.
- [6] CHMELIČKOVÁ, H. *Inovace v oboru laserových technologií a jejich aplikací*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 13 s. ISBN 978-80-244-3076-8.
- [7] KOČMAN, K. *Technologické procesy obrábění*. 1. vyd. Olomučany: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 152 s. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [8] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*. 1. vydanie. Košice: Viena, 2000. 270, 275 s. ISBN 80-7099-430-4.
- [9] MIČIETOVÁ, A; MAŇKOVÁ, I; VELÍŠEK, K. *Top trendy v obrábění. V./VI. část, Fyzikálne technológie obrábania*. 1. vyd. Žilina: Media/ST, 2007, 150-158, 162-167 s. ISBN 978-80-968954-7-2.
- [10] SADÍLEK, M. *Nekonvenční metody obrábění I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 71-72 s. ISBN 978-80-248-2107-8.
- [11] TONKOVIČ, M. *Analýza materiálu pro laserové řezání*. Diplomová práce. VUT Brno, 2014, 22-25 s.
- [12] ZLÁMAL, T. *Vliv řezných parametrů na kvalitu řezu po laserovém řezání*. Diplomová práce. VŠB Ostrava, 2011, 53 - 57 s.
- [13] *Bg steel* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <<http://www.en.bgsteel.bg/Equipment>>.
- [14] DUŠEK, J. *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu*. [online]. 2013 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>>.

- [15] DUŠEK, J. *Co byste rádi věděli o průmyslových laserech*. [online]. 2012 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.mega-blog.cz/lasery/co-byste-radi-vedeli-o-prumyslovych-laserech/>>.
- [16] *Focus variation - a new technology for high resolution optical 3D surface metrology* [online]. Slovinsko, 2009 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://sl.sv-jme.eu/data/upload/2011/03/08_2010_175_Danzl_03.pdf>
- [17] JANIČKOVÁ, P. *Nekonvenční technologie obrábění*. [online]. 2010 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <<http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/laser-projekt-sablona.pdf>>.
- [18] JAROŠ, J. *Rentgenové záření*. [online]. 2016 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://tesla.xf.cz/rentgen.html>>.
- [19] KACHTÍK, L. *Úvod do světa laserů* [online]. [cit. 2016-11-11]. Dostupné z WWW: <<http://lasery.wz.cz/uvod.html>>.
- [20] KACHTÍK, L. *Typy laserů* [online]. [cit. 2016-11-11]. Dostupné z WWW: <<http://lasery.wz.cz/typy.html>>.
- [21] KOŘÁN, P. Seriál na téma lasery - *Laserové řezání* (laser cutting). [online]. 2013 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>>.
- [22] KUSALA, J. *Aplikace laseru* [online]. Lasery kolem nás [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/kap3.html>>.
- [23] KUSALA, J. *Cesta k objevu. Lasery kolem nás*. [online]. 2004 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k12.htm>>.
- [24] *Line 22f1fa19c3m1b7c8e3c Visible Light Spectra Pulse Lasers Formula UFO 5g WOW SETI – Alien Deep Space Signals Communication Device*. [online]. 2013 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <<https://alienspacesciencenews.wordpress.com/2013/04/16/line-22f1fa19c3m1b7c8e3c-visible-light-spectra-pulse-lasers-formula-ufo-5g-wow-seti-aliendeep-space-signals-communication-device/>>.
- [25] LUKAŠEK, J. *Laserové svařování*. [online]. 2007 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <<http://www.welding.cz/laser/svarovani.html>>.
- [26] *Měření drsnosti povrchu* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1103>>.

- [27] MRŇA, L. Technologie využívající laser. *Studijní opory pro výuku předmětu: speciální metody svařování* [online]. FSI VUT v Brně, 2013 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf>.
- [28] *Povrchy povlaků* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf>
- [29] *Roughness Measurement of Sliding Metal Surfaces using the Olympus OLS4100 Laser Confocal Microscope* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <<http://www.olympus-ims.com/en/applications/roughness-measurement-of-sliding-metal-surfaces-using-ols/>>.
- [30] ŘASA, J; JINDROVÁ, J. *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem*. [online]. [cit. 2016-11-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>>.
- [31] ŘASA, J; JINDROVÁ, R. *Laser, laserové technologie a stroje s laserem* [online]. [cit. 2016-11-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserovetechnologie-a-stroje-s-laserem>>.
- [32] ŘASA, J; KEREČANINOVÁ, Z. *Nekonvenční metody obrábění – 4. Díl*. [online]. 2008 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>>.
- [33] *Spontánní emise*. [online]. 2013 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Spont%C3%A1nn%C3%AD_emise>.
- [34] *Steel Grades* [online]. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <<http://www.steel-grades.com/Steel-Grades/Carbon-Steel/1-0038-.html>>.
- [35] *Stimulovaná emise*. [online]. 2013 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Stimulovan%C3%A1_emise>.
- [36] *Systém měření drsnosti - parametry drsnosti* [online]. HOMMEL CS s.r.o. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <https://www.hommel-etamic.cz/files/094_14-hommel-plakat-drsnost-1000x700mm.pdf>.
- [37] TRUMPF. *Oblasti použití* [online]. 2011 [cit. 2016-11-09]. Dostupné z: <<http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblastipouziti.html>>

- [38] Norma ČSN EN ISO 3274, *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Březen 1999
- [39] Norma ČSN EN ISO 4287, *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) Struktura povrchu, Profilová metoda – Termíny, definice, a parametry struktury povrchu*. Český normalizační institut, březen 1999
- [40] Norma ČSN EN ISO 9013 (05 3401), *Tepelné dělení – Klasifikace tepelných řezů – Geometrické požadavky na výrobky a úchylky jakosti řezu*, říjen 2003.
- [41] Norma ČSN EN ISO 17658, *Svařování - Vady při řezání kyslíkem, laserem a plasmou – Terminologie*. Prosinec 2015

Seznam příloh

Příloha A	Vyhodnocení drsnosti vzorku č. 1 – Alicona
Příloha B	Abbottova křivka vzorku č. 1 - Alicona

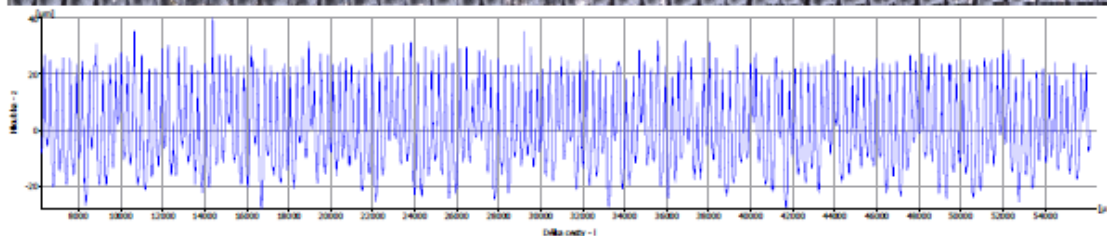
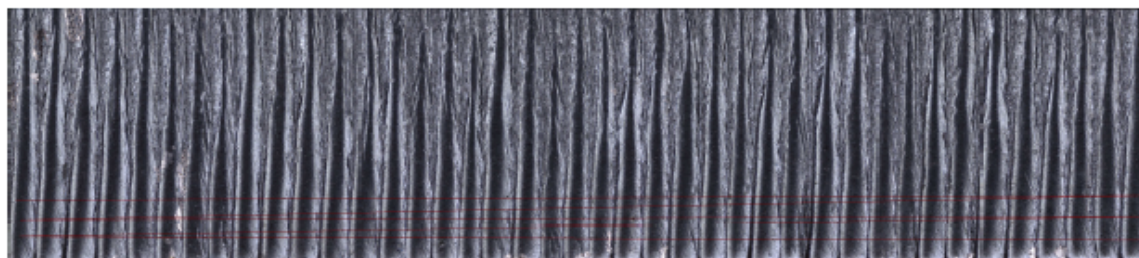
Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

alicon

Measurement Report

Měření profilu

vz_1



Ra: 11.5738 μ m

Rq: 13.7097 μ m

Rz: 60.6506 μ m

Filtr:

horní propust - profil drsnosti

Lc:= 8000.0000 μ m

Alicona Imaging GmbH
Dr.-Auner Strasse 21a
A-8074 Raaba/Graz

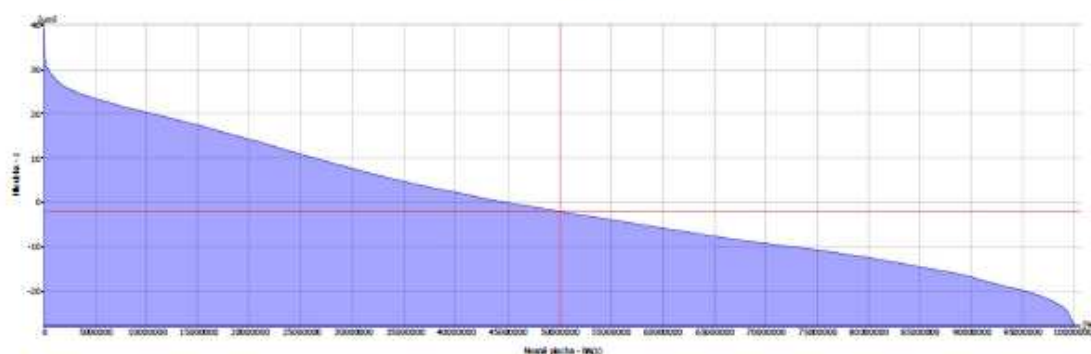
alicon

Measurement Report

Měření profilu

$L_c = 8000.0000\mu\text{m}$

vz_1



Mezura č. 1

$BA(z) [\%] = 50.0000$

$z = -2.0277\mu\text{m}$

Název	Hodnota	[u]	Popis
Rk	36.2270	μm	Hĺoubka drsnosti jadra, výška materiálu jadra
Rpk	11.0767	μm	Redukovaná výška vrcholů, střední výška vrcholů nad materiálem jadra
Rvk	4.9467	μm	Redukovaná výška prohlubní, střední výška prohlubní pod materiálem jadra
Rmr1	16.8500	%	Špičková materiálová složka, část povrchu, která se skládá z vrcholů nad materiálem jadra
Rmr2	95.1000	%	Špičková materiálová složka, část povrchu, která ponese zatížení
l	62402.3495	μm	Délka profilu
Lc	8000.0000	μm	LambdaC: mezní vlnová délka